

Prix : 2 fr. 50.

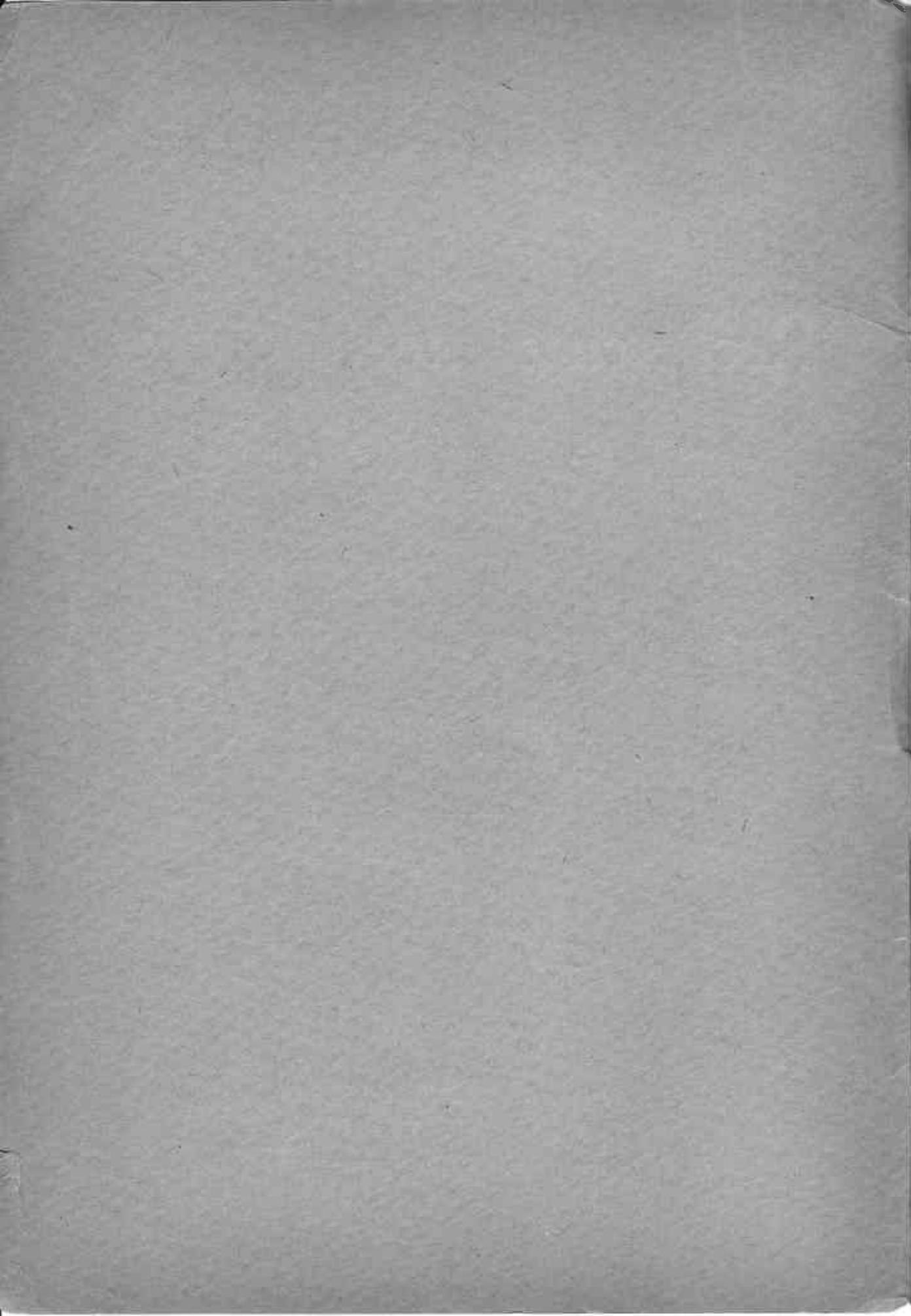
Recherches expérimentales sur le Vol à Voile

Conférence faite à la Société Française de Navigation Aérienne
le 18 Octobre 1922

par le Dr MAGNAN
Directeur à l'Ecole des Hautes Etudes.

Éditions G. ROCHE D'ESTREZ
5, Rue de l'Isly, 5 -- PARIS

1922



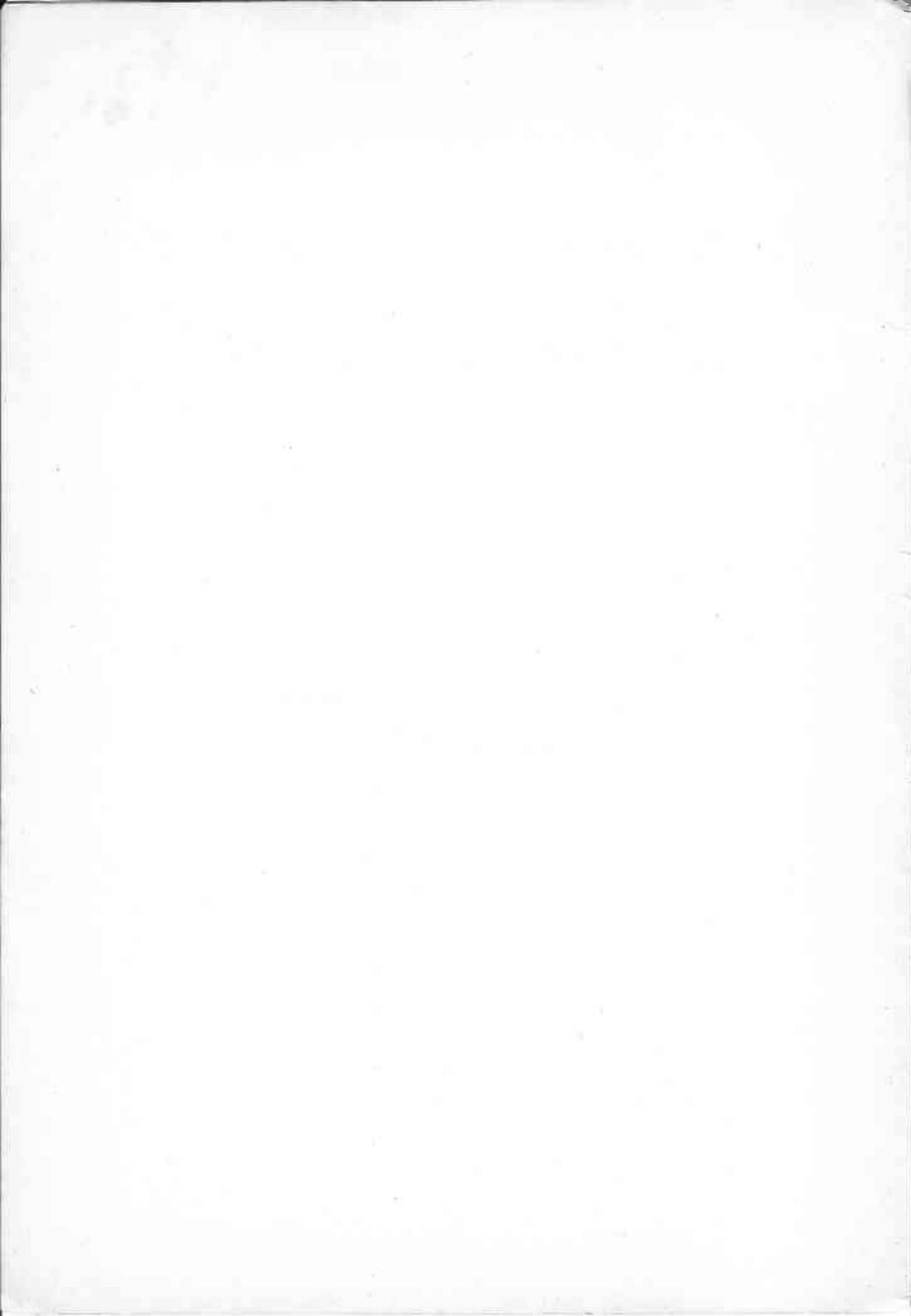
29 figures
~~—~~

Recherches expérimentales sur le Vol à Voile

Conférence faite à la Société Française de Navigation Aérienne
le 18 Octobre 1922

par le Dr MAGNAN
Directeur à l'Ecole des Hautes Etudes.

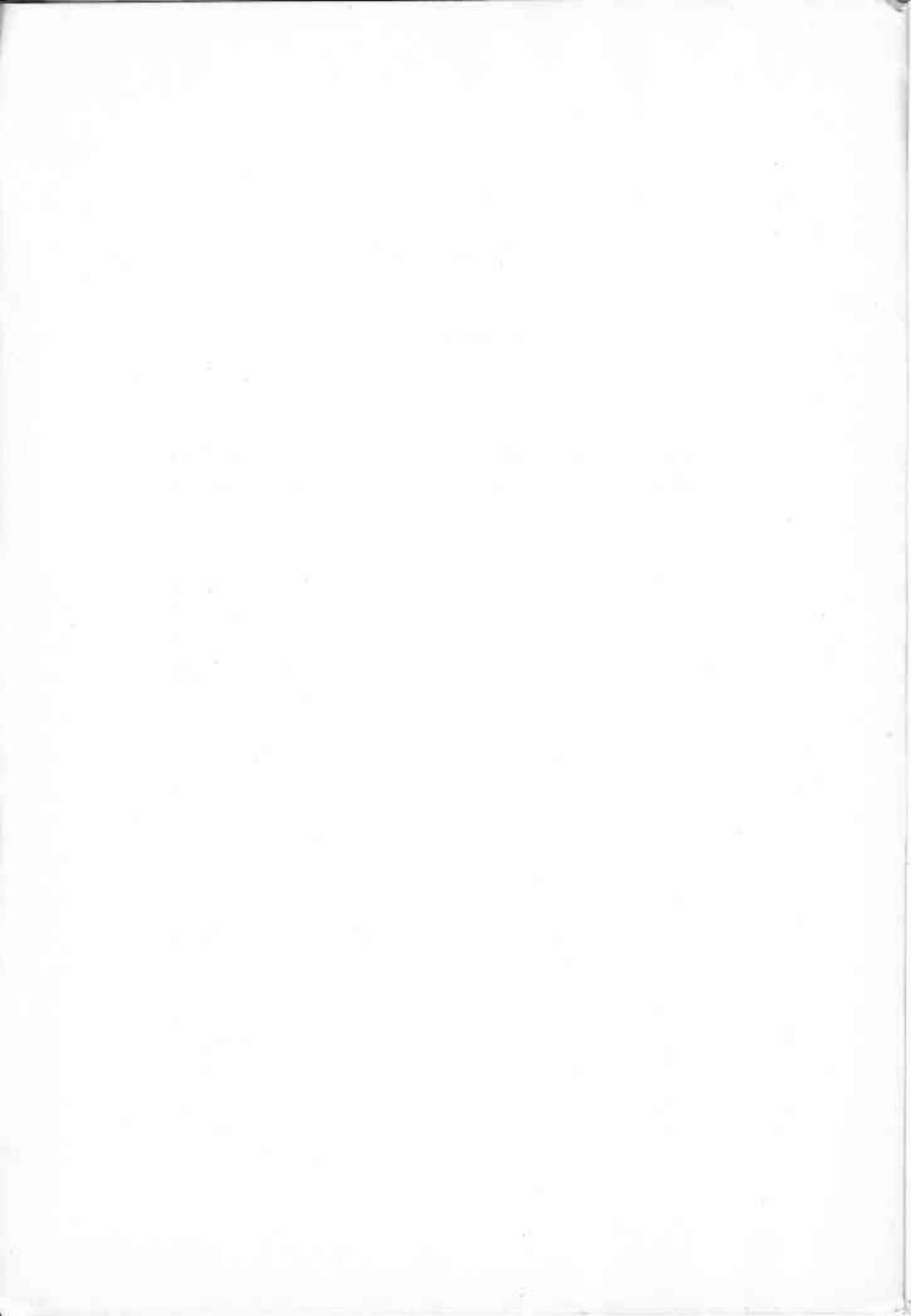
Éditions G. ROCHE D'ESTREZ
5, Rue de l'Isly, 5 -- PARIS
— 1922 —



PRÉFACE

La présente étude est le résultat des recherches que j'ai effectuées depuis la guerre sur le vol à voile. Non seulement elle n'infirme pas les observations que j'avais faites, ni les déductions que j'en avais tirées avant 1914, mais elle les confirme pleinement, en même temps qu'elle apporte une contribution nouvelle en vue de la solution d'un problème actuellement à l'ordre du jour, celui de l'avion sans moteur. Certains des résultats que j'ai acquis présentent, en effet, un intérêt évident par les renseignements qu'ils fournissent, en ce qui concerne le pilotage dans les vents ascendants et aussi pour la construction des avions voiliers destinés à voler dans vents dits horizontaux. Mais je tiens à bien préciser, ici même, que je n'ai pu me livrer à ces dernières recherches que grâce à la bienveillance toute particulière que m'ont témoignée MM. Laurent Eynac, Sous-Secrétaire d'Etat de l'Aéronautique et des Transports Aériens, Rateau, Bouvier, Kœnigs, Breton, membres de l'Institut; le Colonel Renard, Auclair, membres de la Commission supérieure des Inventions; Coville, Directeur de l'Enseignement supérieur; Delabrousse, Chef de bureau au Ministère de l'Instruction publique; Mortier, Directeur adjoint aux Inventions; Legendre, Chef des Services techniques de la Direction des Inventions et aussi et surtout les membres de la Caisse des Recherches scientifiques. A tous, j'exprime ma très vive reconnaissance.

A. M.



Recherches expérimentales sur le Vol à Voile

par le Dr MAGNAN

Directeur à l'Ecole des Hautes Etudes

Les études que je poursuis depuis quinze ans sur le vol des oiseaux et leurs caractéristiques m'ont permis, entre autres, de définir de façon précise le mécanisme du vol à voile et de déterminer exactement l'organisation toute spéciale des véliers, des oiseaux qui font du *vol sans battement*.

Ce sont ces études sur le vol à voile que j'analyserai aujourd'hui dans cette communication en même temps que je donnerai les résultats des travaux que j'ai pu effectuer depuis la guerre sur ce sujet.

On a dénommé vol à voile le genre de locomotion aérienne que pratiquent certains oiseaux qui, les ailes toutes grandes ouvertes, évoluent dans les airs pendant des heures entières, sans paraître exécuter aucun mouvement, sans donner en fait aucun coup d'aile. Il ne faut pas confondre surtout ce mode de vol avec le vol plané. Pendant le vol plané, le Rapace par exemple, ses grandes ailes étendues à angle droit avec l'axe du corps, glisse sur l'air en ligne droite ou décrit des orbes successifs, mais toujours en perdant de la hauteur; il effectue ce vol même si l'air est calme. Il se laisse en réalité descendre sous l'action de la pesanteur, en se servant de l'action de l'air sous ses ailes pour diminuer le plus possible son angle de chute.

En ce qui concerne les oiseaux bons planeurs, comme les Gypaètes, les Aigles, les Buzards, la trajectoire qu'ils suivent dans leurs déplacements est souvent si voisine de l'horizontale qu'ils perdent peu de hauteur. Ils planent, suivant l'expression en usage, de 18 à 20 fois leur hauteur d'après mes propres observations.

Dans le vol à voile, au contraire, le volateur plane si l'on veut, mais il ne perd pas de hauteur dans l'ensemble; il en gagne même à tout instant. Il ne développe pas pour cela de force musculaire, en ce sens qu'il ne bat pas des ailes pendant des laps de temps considérables. Il n'extrait pas la force nécessaire pour pratiquer ce genre de vol du travail de ses muscles. Il la trouve dans le milieu extérieur. C'est le vent qui représente la puissance utilisée par certaines espèces d'oiseaux pour voler à voile sans fatigue. Ce vol, en effet, qui peut être continu, exige pour se produire l'existence d'un vent plus ou moins fort.

Malgré son évidence, le vol à voile a été nié et est encore nié par quelques esprits qui se refusent à admettre ce genre de locomotion aérienne. Cela tient à ce que le vol à voile, s'il a donné lieu à d'intéressantes observations de la part de naturalistes consciencieux, n'a pas été l'objet d'études suffisamment précises. On a vu naître ces dernières années beaucoup de théories sur le vol à voile, mais il a été publié fort peu d'études expérimentales sur ce sujet, et c'est pourquoi ce mode de locomotion semble encore si mystérieux.

C'est à d'Esterno que l'on doit la première définition sérieuse du vol à voile. Après lui, Mouillard, Basté, Bazin, Langley, Lilienthal, Soreau, Painlevé, Hankin ont publié le résultat de leurs travaux sur cette question et montré que l'origine du vol à voile résidait dans l'utilisation par le voilier des vents à vitesse variable.

D'autres auteurs, par contre, comme Pénaud, Froude, sir Hiram Maxim et Idrac,

ont considéré que le vol à voile n'était réalisé par les oiseaux que lorsqu'il y avait des courants ascendants, théorie qui a été combattue plus particulièrement par Mouillard et Henkin.

Il existe comme je l'ai montré, deux formes de vol à voile et par conséquent deux variétés de voiliers. Ceux qui utilisent plus particulièrement pour pratiquer le vol à voile les vents horizontaux forts et ceux qui ne se servent que de vents ascendants quand ils en trouvent et des vents horizontaux faibles. Le premier groupe est constitué par les palmipèdes marins longipernes, comme l'albatros, la frégate, le fou de bassan, le puffin cendré, le goéland marin... ces trois dernières espèces se rencontrant fréquemment sur nos côtes. Le second groupe comprend les rapaces diurnes, tels que les vautours, les aigles, les buzzards, les circaètes et les buse, des échassiers, comme le marabout.

LE VOL A VOILE DES OISEAUX MARINS

J'ai, le premier, indiqué que les palmipèdes marins voiliers exécutent les meilleurs vols à voile lorsque le vent, pour un observateur terrestre, semble continu, mais coupé par des rafales, c'est-à-dire renforcé par moments.

Lorsqu'on cherche à définir la structure du vent utilisé par les palmipèdes marins pour pratiquer le vol à voile, par des moyens sensoriels par exemple qui nous renseignent jusqu'à un certain point sur cette structure, on se rend compte rapidement par expérience que le vent possède le plus souvent une puissance maxima au milieu de la rafale et une puissance minima lorsque la rafale est passée. Entre ces deux extrêmes, il existe une période correspondant à l'arrivée de la rafale où la force du vent croît très nettement et une période correspondant à la fin de la rafale où la force du vent faiblit. Toujours par les mêmes procédés qui ne permettent d'analyser le vent que d'une manière grossière, on trouve que le temps, qui sépare deux rafales sensibles pour les sens, varie de 10 à 15 secondes, que la période de croissance de la force du vent est en général égale à la période de décroissance, qu'enfin les périodes d'accalmie relative sont de longueur variable.

Or les voiliers marins qui savent analyser le vent beaucoup mieux que l'homme, grâce à leur appareil auditif, semble-t-il, d'après mes recherches, utilisent ces rafales de façon particulière et toujours identique, ainsi que l'ont prouvé les études que j'ai pu faire. C'est sur les rafales qu'ils manœuvrent volontairement.

C'est toujours au moment où une rafale commence c'est-à-dire lorsque le vent croît en force que ces oiseaux se présentent le bec au vent et toujours de ce vent qu'ils reçoivent de face, ils font de la hauteur *sans jamais battre des ailes*.

J'ai indiqué que, dans le vol à voile, il y avait deux temps : un premier temps pendant lequel le voilier monte en trouvant la force nécessaire à l'élévation de son corps non dans ses muscles moteurs, mais dans le vent ; un second temps, pendant lequel le voilier plane c'est-à-dire utilisant deux forces, la pesanteur et la résistance que l'air offre à sa chute, descend plus ou moins vite sur les couches d'air. Or, c'est encore un fait que j'ai mis en évidence, quand le voilier marin glisse ainsi sur l'air en perdant sensiblement de la hauteur, il a presque toujours le vent arrière et le vent à ce moment a toujours une force décroissante ou minima. Bref, l'oiseau de ce type se sert du vent dont la puissance augmente, au commencement d'une rafale, pour s'élever. Dès que la puissance du vent commence à diminuer, il exécute fréquemment une sorte de virage, puis il file avec le vent arrière en planant.

Aussitôt que le vent croît en vitesse, les ailes des voiliers marins se déforment de façon particulière : celles-ci prennent, vues de face, la forme d'un V très obtus dont les branches feraient entre elles un angle de 170°, tandis que les extrémités du fouet se recourbent plus ou moins vers le haut. En même temps, les rémiges de

l'éventail, ou aile portante, très arquées vers le bas, lorsque l'animal est appuyé sur ses pattes, se relèvent dès que celui-ci vole, par suite de la charge qu'elles supportent et sous l'action du vent ce qui donne à la section de cette aile une double courbure caractéristique.

A ce moment, les oiseaux sentent qu'ils sont portés et en mesure de gagner de la hauteur; afin d'aider à cette montée, ils raccourcissent alors leur cou pour ramener un peu en arrière leur centre de gravité; ils étalent leur queue et la redressent de manière à lui faire faire avec l'axe du corps un angle déterminé, variable suivant la force du vent et d'autant plus obtus que celle-ci est plus grande. Cette manœuvre correspond à celle du cabré sur les aéroplanes.

Comme je l'ai déjà dit, le volateur ne développe pas de force musculaire pendant ce temps, en ce sens qu'il ne bat pas des ailes, mais le travail musculaire n'est jamais nul cependant; les expériences auxquelles je me suis livré m'ont prouvé, en effet, que les muscles grands pectoraux en particulier sont constamment en action pour soulever le corps et le maintenir dans une situation appropriée par rapport aux ailes qui sont fortement appuyées sur l'air. Il apparaît en même temps que le corps de l'oiseau subit une série d'oscillations verticales, de relèvements et d'abaissements, au cours du vol à voile, comme au cours du vol ramé.

Au cours du vol à voile et du vol ramé par conséquent, on remarque donc que le corps de l'oiseau décrit en plein vol un mouvement oscillatoire avec abaissements et relèvements successifs. En ce qui concerne le vol ramé, ces oscillations verticales s'expliquent facilement; elles sont la conséquence du battement des ailes qui viennent frapper l'air avec violence.

Mais au cours du vol à voile, ces oscillations peuvent être considérées comme la conséquence des coups de vent qui ont pour effet de déplacer l'aile de l'oiseau en dehors de sa volonté et d'occasionner par les variations de portance qui en résultent, les légères oscillations du corps qu'on aperçoit pendant le vol des voiliers.

Le plus souvent, quand la rafale atteint son maximum, les voiliers marins exécutent un virage plus ou moins large et aussitôt que la rafale décroît, ils allongent leur cou, de manière à déplacer leur centre de gravité vers l'avant; ils abaissent plus ou moins leur queue qui reste toujours étalée et ils commencent une descente planée. Cette manœuvre est analogue à celle du piqué fréquemment exécutée par les aviateurs. Ces oiseaux ensuite filent sur l'air avec le vent arrière, comme je l'ai déjà dit. Souvent, ils descendent le fil du vent avec une grande vitesse; ils ramènent alors les pointes de leurs ailes en arrière, et cela d'autant plus, qu'ils veulent aller plus vite. Alors qu'en général ces volateurs suivent le vent avec une vitesse moyenne de 40 kilomètres à l'heure, ils parviennent à atteindre le soixante en flétrissant leurs ailes. Au cours de ce vol plané, l'oiseau perd de la hauteur, mais il sait fort bien ne donner à sa trajectoire qu'un angle de chute insignifiant.

Enfin, lorsqu'une nouvelle rafale approche, l'animal se présente à nouveau le bec au vent et il reprend de la hauteur. Mais, il est un point sur lequel j'ai déjà insisté: c'est que tous les voiliers possèdent à l'instant où ils se présentent contre le vent une certaine vitesse qu'ils ont acquise en courant à la surface des flots, en se lançant d'un rocher ou après avoir exécuté une descente plus ou moins rapide dans le sens du vent.

Les indications que je viens de donner concernent le vol à voile le plus usuel. Mais j'ai fait remarquer aussi que le vent n'a pas toujours, même pour nos sens, la structure que j'ai donnée comme type courant. Quelquefois, la période croissante est à ressauts, pendant lesquels le vent, bien que toujours croissant dans l'ensemble, a sa vitesse qui décroît un peu et momentanément. Le corps de l'oiseau subit de ce fait lors de la montée des arrêts, des débuts de descente contre lesquels il réagit facilement.

Les oiseaux marins voiliers savent aussi tirer parti de tous les vents. S'ils sont à même de se servir des vents ascendants au moment voulu, lorsqu'ils en rencontrent, le long des côtes élevées, ou des vagues, ils peuvent se déplacer aussi dans toutes les directions, par conséquent, effectuer des voyages. C'est ainsi que s'ils veulent aller en ligne droite contre le vent, ils gagnent de la hauteur lorsque la vitesse du vent est croissante, et ils profitent des périodes d'accalmie pour avancer plus ou moins vite en descente planée mais toujours en sens contraire de la direction du vent, progressant en somme comme le chariot d'une montagne russe.

LA STRUCTURE DES VENTS DITS HORIZONTAUX

Pour des travaux de l'ordre de ceux que je poursuis et qui ont pour but de déterminer, en vue d'une application à l'aviation, le mécanisme exact du vol à voile, il y a un très gros intérêt à chercher à définir l'énergie du vent utilisable pour le vol à voile. Il faut donc se rendre compte s'il est possible de connaître l'amplitude et la période probables des variations de vitesse du vent pour un vent déterminé. Car c'est de la connaissance de ces deux données que dépend la détermination de l'énergie qu'un oiseau ou un avion voilier peut tirer de ce vent dans lequel il doit évoluer; si on connaît en effet la loi qui donne la vitesse d'un vent supposé horizontal et de direction constante en fonction du temps, on pourrait calculer l'énergie, je le répète, qu'un oiseau ou un avion voilier de qualités aérodynamiques connues pourrait retirer de ce vent, à condition d'avoir défini les manœuvres de pilotage à effectuer à chaque instant.

Dans le but d'obtenir les éléments nécessaires à l'étude de cette énergie, j'ai voulu chercher à définir les variations de vitesse du vent d'une façon aussi proche de la vérité que possible. À cet effet, je me suis servi, après de multiples essais effectués avec des appareils divers tels que des cerfs-volants dont la corde était fixée à un ressort, d'un appareil composé d'un moulinet hélicoïdal actionnant directement une magnéto dont l'induit est monté sur bille et sur lequel est calé le moulinet.

Le courant produit par la magnéto est reçu dans un voltmètre à cadre mobile apériodique, de grande dimension, de grande résistance, à 3 sensibilités et actionnant une plume légère en aluminium qui trace les courbes à l'encre sur un enregistreur à cylindre. Les vitesses de déroulement des cylindres employés ont été de 52 minutes, 6 minutes, 26 secondes et 13 secondes.

L'examen des tracés obtenus grâce à cet appareil m'a permis de faire quelques constatations intéressantes. Tout d'abord on s'aperçoit que le vent quel qu'il soit a une propriété constante : *l'irrégularité*. Il apparaît aussi que, contrairement à ce qu'on était en droit d'attendre des observations dues à nos sens, une classification absolue de tous les phénomènes aériens est arbitraire, car les phénomènes se révèlent aussitôt sans lien avec des lois régissant vraiment leur période et leur amplitude. Les graphiques que fournissent les enregistrements sur le cylindre se déroulant en 6 minutes montrent cependant qu'il existe par moment des oscillations dont la durée moyenne est d'environ une minute (fig. 1 et 2). Ces sortes de vagues sont constituées par la succession d'autres oscillations plus courtes dont la durée varie entre 8 et 20 secondes, et est très souvent voisine de 15 secondes. Ce sont ces oscillations secondaires que j'ai dénommées *rafales*. De leur examen il ressort que la période de croissance de vitesse de la rafale paraît plus courte que celle de la décroissance ; il ressort aussi que ces rafales sont à ressauts comme l'indiquent nos sens, par suite de l'existence d'oscillations plus rapides.

De plus on voit que les variations de la vitesse du vent au cours d'une rafale atteignent facilement plusieurs mètres par seconde, que quelquefois à la fin d'une rafale cette vitesse s'annule complètement pour remonter ensuite et rapidement à 10, 12, et 15 mètres par seconde. Ainsi pour un vent moyen de 10 m., j'ai trouvé



Fig. 1. — Vitesse instantanée du vent enregistrée avec l'anémomètre à magnéto.

La vitesse de déroulement du cylindre a été de 1 tour en 6 minutes. — (En abscisses, les temps, 6 minutes pour toute la bande.) —
 (En ordonnées, les vitesses du vent, trois fois plus petites que celles indiquées sur l'échelle du graphique en décimètres.) —
 Le tracé révèle des vagues aériennes constituées par une succession de grandes oscillations de durées plus courtes, les *rafales*.

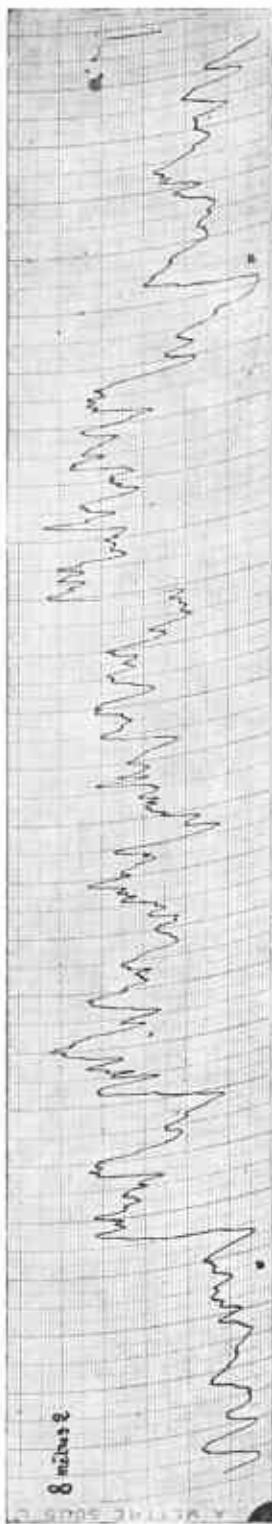


Fig. 2. — Vitesse instantanée du vent enregistrée avec l'anémomètre à magnéto.

La vitesse de déroulement du cylindre a été de 1 tour en 6 minutes. — (En abscisses, les vitesses du vent.) —
 (En ordonnées, les vitesses du vent.) —
 Les grandes oscillations inscrites sur cette bande correspondent aux rafales, qui ici sont nettement à ressauts.

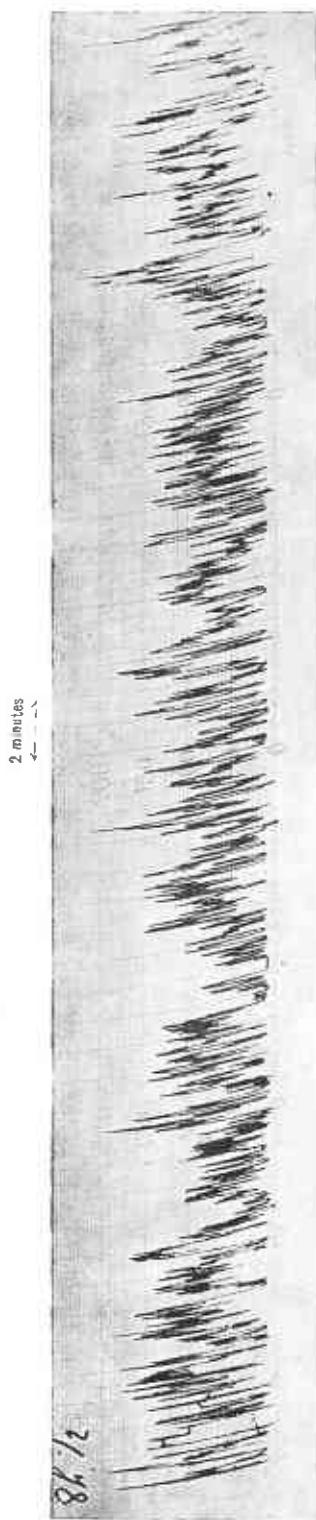


Fig. 3. — Vélocités instantanées du vent enregistrées avec l'anémomètre à magnéto.
La vitesse de déroulement du cylindre a été de 1 tour en 52 minutes. — (En abscisses, les temps, 52 minutes pour toute la bande.)
— (En ordonnées, les vitesses du vent en décimètres.)
Ce tracé montre la grande amplitude des oscillations existant dans les vents assez forts.

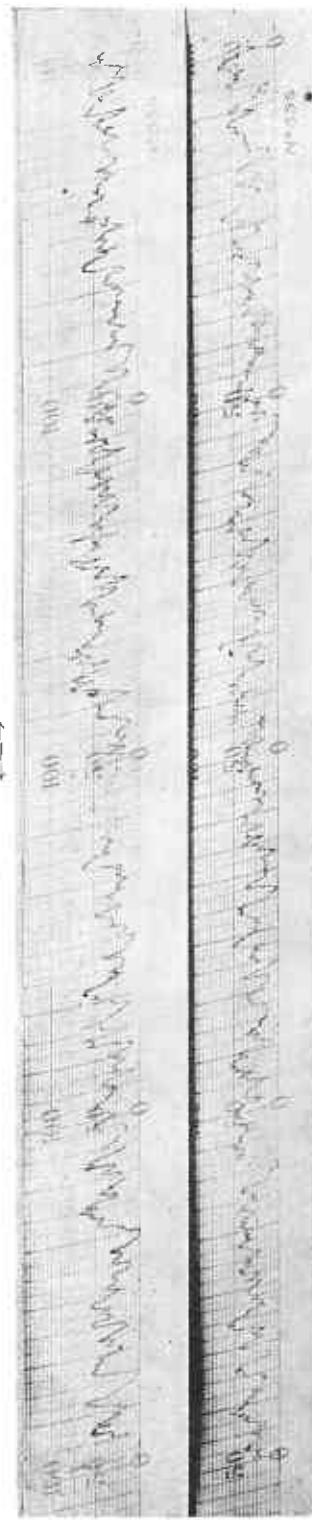


Fig. 4. — Vélocités instantanées du vent enregistrées avec l'anémomètre à magnéto.
La vitesse de déroulement du cylindre a été de 1 tour en 52 minutes. — (En abscisses, les temps, 52 minutes pour toute la bande.)
— (En ordonnées, les vitesses du vent en décimètres.)
Ce tracé montre une amplitude des oscillations qu'en rencontre dans les vents faibles est plus réduite que celle qui existe dans les vents forts.

des oscillations au cours desquelles la vitesse passe de 8 mètres à 1 mètre, puis aussitôt s'élève de 1 mètre à 17 mètres; l'écart entre les maxima et les minima pour un tel vent est d'ailleurs très variable; il est toujours de l'ordre de 3 à 4 mètres au moins; il atteint quelquefois 15 mètres. Par contre, pour des vents plus faibles, l'amplitude des oscillations est plus petite, si bien qu'il apparaît que l'importance des variations de la vitesse instantanée du vent est d'autant plus grande que la vitesse moyenne du vent est plus considérable (fig. 3 et 4).

Toutefois, ces constatations ne correspondent pas absolument à la réalité, en raison des défauts que présente l'appareil utilisé. C'est ainsi que par vent faible, le moulinet ne démarre que difficilement par suite de frottements excessifs; il suit mieux par contre la vitesse instantanée du vent lorsqu'il est lancé. De plus ce moulinet a une inertie trop considérable. En air calme, il met en effet 2 secondes à s'arrêter sous l'effet des frottements dus à la magnéto et pour une vitesse initiale de l'ordre de 5 mètres à la seconde. De ce fait, il résulte que si les écarts entre les rafales qu'indiquent les graphiques sont identiques à ceux qui existent réellement, par contre les amplitudes des variations de vitesse sont plus faibles que normalement; de ce fait les tracés sont fortement déformés.

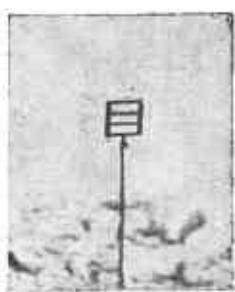


Fig. 5. — Anémomètre à fil chaud.

Les constatations que j'avais faites méritaient donc d'être contrôlées à l'aide d'un appareil plus sensible. Pour cela, MM. Huguenard, Planiol et moi, avons employé une méthode, analogue à celle du bolomètre, où on mesure les variations de résistance dues au refroidissement par le vent d'un fil de platine très fin porté à une tempéra-



Fig. 6. — Cabine d'expérience pour l'étude des vents marins et appareils enregistreurs de la vitesse instantanée du vent

ture très élevée par un courant électrique (fig. 5). Ces variations de résistance sont inscrites au moyen d'un voltmètre à courtes périodes fortement amorties (fig. 6).

Cette méthode est en cours d'étude; elle fera l'objet d'une publication quand

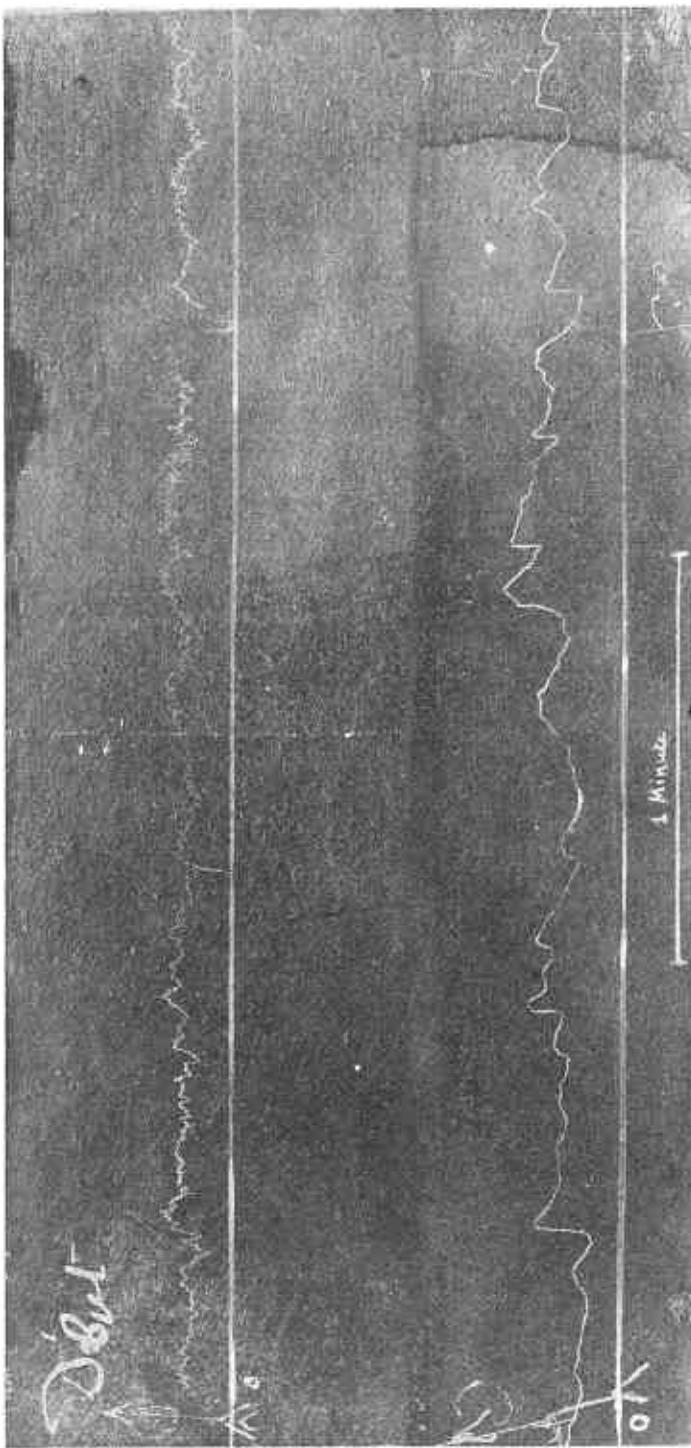


Fig. 7. — Vitesses instantanées du vent enregistrées, au même temps, sur le même cylindre, avec l'anémomètre à fil chaud (en haut) et avec l'anémomètre à magnéto (en bas).

Les deux tracés montrent la simultanéité des inscriptions obtenues avec les deux appareils.

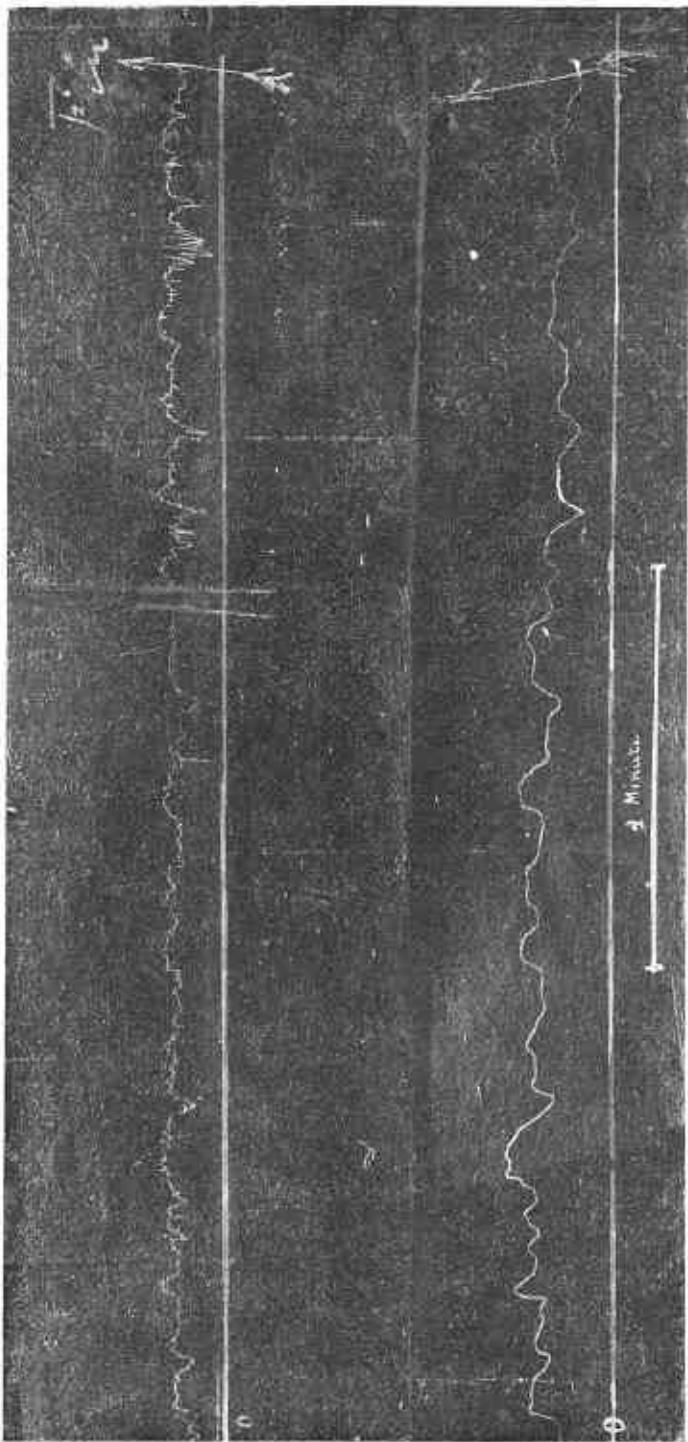


Fig. 8. — Vitesses instantanées du vent enregistrées, en même temps, sur le même cylindre, avec l'anémomètre à fil chauffé (en haut) et avec l'anémomètre à magnéto (en bas).

Cet enregistrement fait suite au précédent (fig. 7).

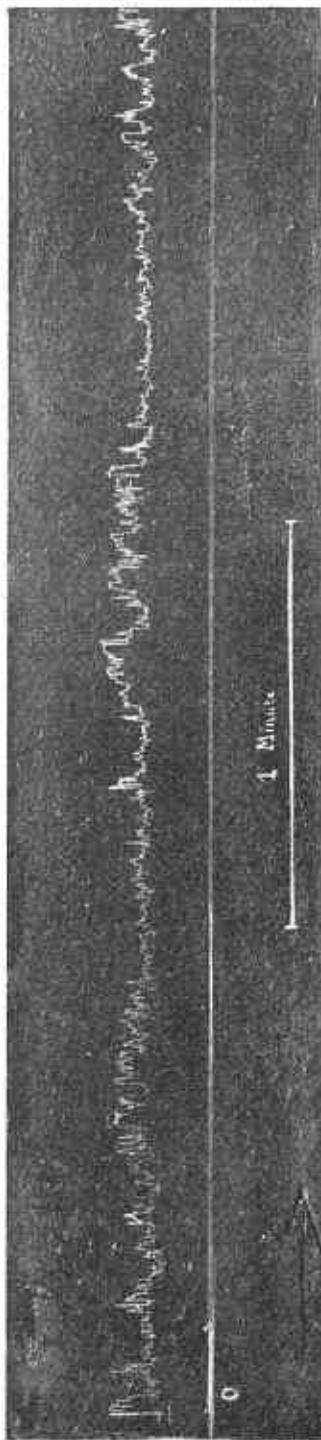


Fig. 9. — Vitesses instantanées du vent enregistrées avec l'anémomètre à fil chaud.

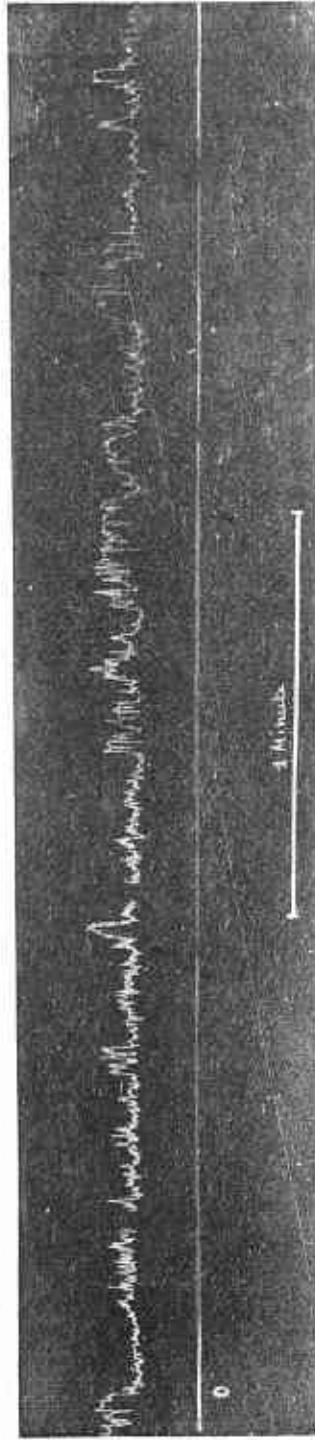


Fig. 9 bis. — Vitesses instantanées du vent enregistrées avec l'anémomètre à fil chaud.
(Ce tracé fait suite au précédent.)

les résultats qu'elle donne seront absolument satisfaisants et lorsqu'elle sera véritablement au point. L'appareil présente en effet actuellement des défauts dont l'un réside dans une sensibilité insuffisante au point de vue de la mesure de la vitesse du vent, cette sensibilité variant beaucoup trop avec cette vitesse.

L'appareil inscripteur actuellement employé ayant une période d'oscillation un peu inférieur à $1/7^{\text{e}}$ de seconde et le temps nécessaire à l'établissement de l'équilibre thermique dans le fil semblant du même ordre, l'inscription de phénomènes d'une durée inférieure au $1/7^{\text{e}}$ de seconde reste très aléatoire et probablement assez infidèle.

Parmi les constatations que nous avons pu faire jusqu'ici, quelques-unes cependant sont à retenir. En inscrivant sur le même cylindre enduit de noir de fumée les tracés que donnent les styles de l'anémomètre à magnéto et de l'anémomètre à fil chaud, on remarque tout d'abord que les oscillations que j'ai dénommées rafales

sont reproduites par les deux appareils avec une bonne simultanéité et une durée qui est de l'ordre de celle que j'ai déjà signalée (fig. 7 et 8). Mais il apparaît aussi que grâce à sa sensibilité particulière, l'anémomètre à fil chaud enregistre de nouvelles oscillations plus petites que nous appellerons pulsations (fig. 9) et qui sont au nombre de 5 à 7 environ à la seconde (fig. 10), la succession de ces pulsations étant d'autant plus rapide que le vent est plus fort.

Il résulte donc de ces études que le vent est constamment en état de vibration et que les vibrations qui sont la conséquence de cet état sont de plusieurs ordres de grandeur. Il n'est pas sans intérêt non plus de faire remarquer que ces mouvements aériens ne

sont pas sans analogie avec ceux que l'on constate à la surface de la mer, les rafales pouvant être comparées aux vagues et les pulsations aux rideaux qu'on observe sur les eaux marines.

J'ai fait entrevoir l'intérêt qu'il y aurait, pour la pratique du vol à voile par l'homme, à pouvoir déterminer l'énergie du vent utilisable pour le vol à voile, ce qui serait assez facile si le vent avait une période et une amplitude d'oscillation définies. Mais comme le montrent les résultats de ces premières études sur le vent, il n'y a pas dans le vent de période et d'amplitude définies; il y a au contraire des variations qui n'ont ni amplitude, ni période fixes. Il existe cependant une énergie disponible, mais il nous est impossible actuellement de la calculer d'une façon précise, autrement qu'en définissant un maximum et un minimum probables entre lesquels cette énergie est vraisemblablement enfermée.

Il n'est pas possible par conséquent pour le moment de détailler davantage les phénomènes et de mieux définir leurs actions respectives dans le vol à voile. Ce résultat ne pourra être obtenu que lorsque la méthode que nous employons sera absolument au point, que lorsque nous aurons pu enregistrer un très grand nombre de tracés qui nous permettront alors une étude statistique.

LES COURANTS ASCENDANTS ET LE VOL A VOILE DES RAPACES

Les oiseaux du groupe des rapaces diurnes voiliers ne peuvent voler à voile par vents horizontaux forts. C'est un fait que Mouillard a observé et que j'ai observé moi-même très fréquemment. Ces volateurs par vents violents sont culbutés, roulés; ils exécutent d'énormes bonds dans l'espace; ils sont désemparés alors que par les mêmes vents les puffins cendrés, par exemple, évoluent avec aisance. Par contre,

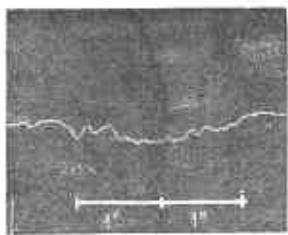


Fig. 10. — Pulsations rapides du vent enregistrées avec l'anémomètre à fil chaud.

les rapaces voiliers utilisent fort bien les vents horizontaux à variations de vitesse, lorsque ceux-ci sont faibles, et cela, en l'absence de tout vent ascendant.

Ces observations concordent avec celles faites par Mouillard et par Hankin qui, par contre, n'ont pas admis l'utilisation des vents ascendants par les oiseaux.

En vérité, toutes les espèces de ce groupe s'adonnent plus volontiers que les autres oiseaux au vol à voile au moyen des vents ascendants, souvent même de préférence au vol à voile par vent horizontal.

Pour l'étude des courants ascendants, j'ai employé divers procédés, que je ne puis décrire ici. Je dirai cependant, qu'une méthode m'a donné des résultats intéressants en me permettant de rendre visible l'écoulement et, par conséquent, la forme des courants aériens. J'ai utilisé à cet effet, des ballons de diamètre variable suivant l'altitude à atteindre. Ces ballons étaient gonflés avec de l'hydrogène. Pour les expériences à petite hauteur, ils étaient chargés de façon à ce qu'ils fussent en équilibre dans une atmosphère calme, et lancés tels quels. Pour les études à effectuer à une altitude assez élevée, les systèmes étaient préparés de manière

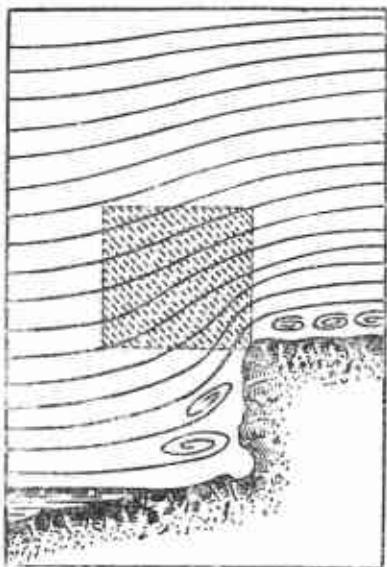


Fig. 11. — Déviations subies par les diverses couches d'un vent horizontal rencontrant une falaise à pic, avec la zone la plus favorable au vol à voile indiquée par les hachures obliques et les zones de tourbillons.

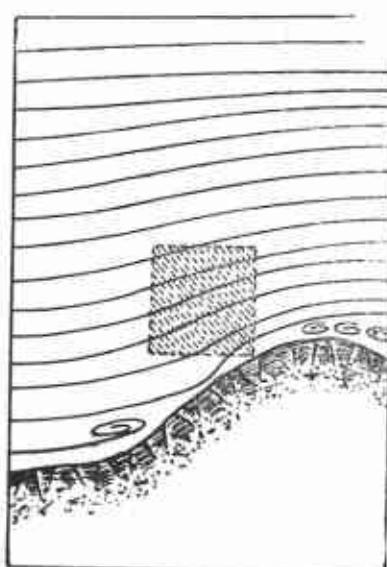


Fig. 12. — Déviations subies par les diverses couches d'un vent horizontal rencontrant une pente assez inclinée et développée en largeur, avec la zone la plus favorable au vol à voile indiquée par les hachures obliques.

à ce qu'il soit possible d'enlever au moment du départ une charge déterminée. On laisse ainsi au ballon une petite force ascensionnelle qui rend l'expérience moins précise, mais qui est nécessaire en raison de la porosité du ballon dont les pertes en gaz fausseraient rapidement les résultats à partir d'une certaine hauteur. Au moment voulu, on laisse partir le ballon; on en lâche d'autres simultanément en d'autres points. Les ballons, dont la force ascensionnelle est nulle ou très faible s'ils ont été déchargés, sont entraînés par les courants d'air dont ils suivent assez fidèlement le trajet. En prenant au départ, puis à des intervalles réguliers, des photographies des ballons, en même temps qu'on note les temps et certains points de repère, on peut, grâce aux clichés, déduire la trajectoire des ballons, leur hauteur

au-dessus d'un horizon déterminé et aussi leur vitesse de déplacement. On possède ainsi des éléments suffisants pour définir la déviation des courants aériens par les inégalités du sol. On peut aussi, par ce moyen, déterminer les zones de vents ascendants quelle qu'en soit l'origine.

Voici les conclusions que j'ai pu tirer de mes études :

Il y a lieu de distinguer 2 types de courants ascendants. Les premiers sont dus aux inégalités de la surface terrestre et sont appelés dynamiques. Disons de suite que ce sont les plus communs dans la nature. Ces vents ascendants sont provoqués par les courants horizontaux rencontrant une pente plus ou moins inclinée sur l'horizon, une falaise, une montagne, une forêt, un mur, etc... .

Quand des couches de vent horizontal viennent frapper sur une falaise verticale, les plus basses donnent naissance à des tourbillons au pied de l'obstacle, tandis que les autres sont rejetées vers le haut jusqu'à la crête de la falaise; pendant ce temps, elles rencontrent d'autres couches qui ont conservé leur trajectoire horizontale; celles-ci subissent à leur tour du fait de cette rencontre, une déviation plus ou moins importante qui se répercute plus ou moins haut au-dessus du faîte de l'obstacle sur les couches supérieures du courant aérien; mais, en même temps, cette série de frottements a pour effet de rabattre peu à peu les couches primitivement déviées qui reprennent bientôt l'allure du courant général. Ces déviations sont encore sensibles à une hauteur qui égale trois fois environ celle de la falaise. Toutefois, c'est à l'avant du bord supérieur de la falaise que se trouve la partie du courant ascendant qui présente le plus d'intensité; la partie de ce courant la meilleure pour les oiseaux voiliers, est au moins égale en largeur et en hauteur au-dessus de la crête de la falaise, à la hauteur de l'obstacle. A l'arrière de ce bord supérieur, au-dessus des terres par conséquent, il existe, par contre, une zone défavorable parce qu'elle est le siège de mouvements tourbillonnaires (fig. 11).

Il y a lieu de noter aussi que la vitesse du courant ascendant est supérieur en avant du faîte de la falaise à la vitesse moyenne du courant horizontal et qu'elle s'affaiblit en dehors de la zone la plus favorable.

Dans les régions montagneuses, comme les Alpes, les Pyrénées, le Jura, par exemple, on rencontre fréquemment des masses d'air devenues ascendantes parce qu'elles ont frappé des pentes plus ou moins inclinées. Si le développement de ces pentes est considérable en largeur, et si leur inclinaison est assez grande, il y a formation d'une nappe ascendante comme dans le cas de la falaise. Mais ici, la zone très favorable commence en avant d'une ligne horizontale passant par le quart ou le tiers supérieur de la pente (fig. 12); de plus, cette zone s'étend moins haut. Cette hauteur dépend d'ailleurs de la vitesse du vent et de l'inclinaison de la pente frappée par le vent; elle égale environ les deux tiers de la hauteur réelle de l'éminence au-dessus du sol environnant et les déviations ne se font plus guère sentir à une altitude supérieure à deux fois la hauteur de l'obstacle.

Si le vent rencontre, par contre, un piton isolé, l'écoulement de l'air n'est plus exactement le même que dans les cas précédents. Le courant, si la pente n'est pas trop accentuée, suit assez bien la surface de cette pente placée au vent; il garde alors sensiblement sa vitesse normale. Au faîte de la colline, cette portion du vent continue à monter dans l'atmosphère, mais elle est rabattue assez rapidement par les couches supérieures du courant aérien. Il se produit là, de plus, un phénomène complexe; si les couches inférieures de la masse d'air déplacée sont bien déviées de l'horizontale dans les mêmes proportions que le sol, les couches un peu plus élevées subissent des déviations beaucoup moins nettes, parce qu'elles peuvent plus facilement s'écouler en contournant le sommet de la hauteur; aussi, le courant ascendant est-il ici plus limité, en raison aussi des tourbillons qui se forment sur la face abritée de la colline; il n'est, en outre, jamais sensible à une très grande hauteur au-dessus de la colline.

Tous les rapaces voiliers qui vivent dans les régions accidentées, recherchent

les courants ascendants d'origine dynamique. Les aigles, les gypaëtes, les vautours, les condors, les pygargues, les buses elles-mêmes savent en tirer tout le parti poss.b'e, non seulement pour se maintenir dans les airs sans battre des ailes, mais encore pour se déplacer.

Etant donnée leur origine, ces courants ascendants sont assez agités. Les rapaces les utilisent tant que la vitesse des courants n'est pas trop considérable. Quand cette vitesse croît, l'oiseau résiste à l'action trop forte du vent, en diminuant sa surface portante par un léger repliement des ailes. Mais dès que la violence du vent est trop grande, il se produit des oscillations verticales du corps de l'animal, qui exécute des bonds dans l'espace à chaque passage de rafales, lesquelles agissent sur lui comme autant de coups brusques portés du bas vers le haut. De ce fait, il est ballotté et souvent même déséquilibré par l'excès de l'énergie qu'il trouve dans le vent.

Par contre, dès que la vitesse du courant ascendant s'annule le rapace commence à descendre et il n'a plus qu'un moyen de s'opposer à cette descente : c'est de battre des ailes.

Aussi, rencontre-t-on ces oiseaux dans les endroits où se trouvent réunies les conditions nécessaires pour la pratique du vol à voile, c'est-à-dire dans les contrées où il existe des falaises verticales ou à pentes très fortes, ou des montagnes avec des précipices escarpés, là où il y a régulièrement ou tout au moins fréquemment et non occasionnellement des courants ascendants favorables. Plus une région accidentée est ventilée avec régularité et sans trop de violence, plus l'air est rempli de rapaces voiliers.

Les condors, les aigles, les pygargues fréquentent de préférence de tels lieux, surtout lorsqu'ils y rencontrent des parois verticales, qu'ils ont appris à connaître d'ailleurs et qu'ils savent capables de leur faire gagner de la hauteur ou de les empêcher tout au moins d'en perdre.

Ils se tiennent dans la zone du vent devenu ascendant, parce qu'il a frappé l'obstacle, dans la partie située en avant et au-dessus du bord supérieur de cet obstacle. Ils louvoient dans cette zone pour conserver une hauteur favorable et ils évoluent de façon à progresser en suivant la crête de la falaise ou de la masse rocheuse. On voit fréquemment au bord de la mer, les pygargues, tout comme les mouettes et les goélands se placer face au vent et s'efforcer de conserver toujours le bec au vent. Leur corps est légèrement cabré, son grand axe étant dirigé vers le haut. Ils se déplacent alors latéralement en longeant la falaise dans un sens ou dans l'autre, et ils manœuvrent constamment avec leur queue de manière à ce que ce déplacement s'effectue presque parallèlement au bord supérieur de la falaise. Pour arriver à ce résultat, ils orientent l'axe de leur corps, de façon à ce que l'avant soit tourné vers la droite, si le déplacement se fait vers la droite, ou vers la gauche si le déplacement se fait vers la gauche. De plus, l'oiseau n'exécute aucun virage pour changer de direction ; il se contente de changer l'orientation de l'axe de son corps lorsqu'il veut changer le sens de sa marche.

Dans les contrées où les courants ascendants sont moins étendus par suite de la conformation du terrain, dans la région des Puys par exemple, les rapaces s'élèvent dans la zone favorable en décrivant des cercles, puis ils descendent en vol plané en dehors de cette zone pour y revenir ou en gagner une autre lorsqu'ils le jugent nécessaire. Comme ils ont nettement l'intuition des mouvements de l'air, on les voit même se déplacer dans l'espace sans perdre sensiblement de hauteur par l'utilisation successive des zones sustentatrices qu'ils rencontrent en volant.

Pendant qu'ils volent à voile, les rapaces voiliers ont presque constamment leurs ailes largement déployées, faisant un V latéral et longitudinal de 170° environ. De ce fait, les pointes des ailes sont portées en avant et en haut, ce qui a pour résultat de faire cabrer légèrement le corps de l'oiseau. De plus les rémiges primaires sont

séparées les unes des autres dans leur portion terminale et leur extrémité est le plus souvent soumise à des vibrations qui ont un caractère passif et sont occasionnées par les vibrations de l'air ambiant. Enfin, la queue de ces volateurs est toujours très étalée et sans cesse en mouvement pour empêcher le corps de dévier pendant le vol.

Il existe une seconde série de courants ascendants qui sont d'origine thermique.

Quand l'influence des rayons solaires commence à se faire sentir dans la première partie du jour, la surface de la terre s'échauffe rapidement; elle fournit alors de sa chaleur à l'air environnant qui, devenant plus léger spécifiquement, tend à monter. Il se produit dans ces conditions un courant ascendant qui croît et décroît en intensité suivant les saisons, avec la chaleur du jour, qui diminue entre autres dans la journée lorsque des nuages épais s'interposent plus ou moins longtemps entre la terre et le soleil. La vitesse de ce courant est toujours assez faible; elle est environ de 1 m. 50 à la seconde, elle dépasse rarement deux mètres. De plus, ce courant est capable de s'élever très haut, atteignant dans les régions désertiques au moins 2.000 mètres de hauteur, en plein été. On rencontre des courants d'origine thermique surtout en Afrique; il s'en produit, cependant, en Europe aussi, au cours de l'été, dans les vallées des pays de montagnes, sur les côtes, mais là, le courant est moins puissant; il s'élève beaucoup moins haut.

Ces masses d'air ascendantes sont utilisées aussi par les oiseaux pour gagner de la hauteur. Toutefois c'est surtout dans les contrées désertiques que les voiliers en font un large usage.

Lorsqu'on étudie la distribution des courants ascendants d'origine thermique, en Afrique, on voit qu'il existe des zones de quelques centaines de mètres de largeur où les courants ont une composante ascendante et des zones où les courants ont une composante descendante. En général, les zones de courant ascendant sont vaguement cylindriques et ont 250 à 300 mètres environ de diamètre, mais quelquefois elles affectent la forme d'une ellipse allongée de plusieurs kilomètres de longueur et orientée dans le sens du vent horizontal qui est la cause de cet allongement. Dans ces zones on constate toujours, au cours de la journée, la présence de nombreux voiliers: vautours, milans qui montent, les ailes et la queue grandement étalées, en décrivant des cercles successifs afin de se maintenir dans la région favorable et qui atteignent ainsi de hautes altitudes. De là, ils se laissent glisser sur l'air en perdant de la hauteur. Ils traversent alors, suivant une trajectoire inclinée vers le bas et en ligne droite, les plages où le courant aérien a une composante descendante, jusqu'à ce qu'ils rencontrent une nouvelle colonne d'air ascendant. Toutes ces observations qui résultent des études que j'ai pu faire en Tunisie et en Tripolitaine sont en accord absolu avec celles faites par M. Idrac qui s'est livré à des recherches extrêmement précises sur ce sujet.

LES CARACTERISTIQUES DES OISEAUX VOILIERS

Or j'ai, le premier, montré que les divers groupes de voiliers et les rameurs possèdent des caractéristiques différentes. Leurs surfaces alaires, leur envergure, l'acuité de leurs ailes, leur queue sont loin d'être les mêmes. Pour obtenir des rapports homogènes et comparables, j'ai rapporté la surface des ailes ou de la queue à la surface du corps obtenue en déterminant la quantité de peinture lourde nécessaire pour recouvrir ce corps ou calculée par la formule $\sqrt{\frac{P^2}{P^2}}$. J'ai trouvé par les deux méthodes des résultats identiques. J'ai comparé, de même, l'envergure, la

largeur d'aile, la longueur de la queue à la longueur réelle du corps de l'oiseau ou à la longueur calculée par la formule $\sqrt[3]{P}$, P étant le poids exprimé en grammes. J'ai encore obtenu par ces deux procédés des résultats identiques. Voici les chiffres moyens que j'ai trouvés pour les groupes d'oiseaux suivants en rapportant les surfaces à la racine cubique du poids porté au carré, les longueurs ou largeurs à la racine cubique du poids, les poids au poids du corps :

	Rapaces voiliers	Palmipèdes voiliers	Colombins rameurs
	— gr.	— gr.	— gr.
Poids moyens.....	1.869,5	2.552,7	326,3
Longueur relative du corps.....	6	6,1	5,2
Surface alaire relative.....	25,9	16,9	12,1
Poids relatif des ailes.....	214,5	172,4	141,2
Envergure relative.....	14,2	14,7	9,5
Largeur relative des ailes.....	2,46	1,59	1,75
Acuité des ailes (allongement).....	5,7	9,7	5,4
Longueur relative de la queue.....	2,5	1,8	1,9
Surface relative de la queue.....	7,2	2,3	4,2
Rapport de la surface alaire à la surface caudale.....	4,4	8	3,1
Epaiss. relative des ailes au 1/4 interne	0,36	0,35	0,30
Poids relatif du moteur aviaire.....	141,7	130,4	273,2

On peut constater, par l'examen de ce tableau, que les trois groupes d'oiseaux sont très différemment voilés. Les voiliers possèdent une grande surface alaire et une grande envergure relatives, et c'est justement parce qu'ils sont bien voilés qu'ils sont capables d'effectuer des vols à voile ou des planements de longue durée. Toutefois, j'ai fait remarquer que les palmipèdes voiliers qui utilisent le vent horizontal font le plus souvent, ont une surface alaire plus petite que les rapaces voiliers qui se servent surtout des vents ascendants ou des vents horizontaux faibles. Cela tient à ce que si l'envergure relative est, en somme, la même dans les deux séries, la largeur d'aile est très différente. Celle-ci est très grande chez les rapaces, plus restreinte chez les palmipèdes, comme la queue d'ailleurs, et cela parce qu'une aile étroite et une queue courte, ou mieux, de petite surface, est nécessaire pour voler dans les grands courants d'air, à un tel point que chez ces oiseaux, l'aile est d'autant plus étroite que la vitesse du vent qu'ils peuvent utiliser au cours de leur vol est plus considérable. Aussi l'acuité des ailes (ou allongement) est-elle plus grande chez les palmipèdes voiliers. Pour cette raison, ceux-ci possèdent une aile droite et pointue dont l'extrémité apparaît comme constituée par une seule rémige. Les rapaces voiliers, au contraire, ont une aile ovale avec cette particularité que ses extrémités libres sont découpées en lanières, par suite du rétrécissement brusque du bout des grandes pennes primaires qui laissent alors entre elles des espaces interdigités variables, mais toujours analogues. En vérité, l'aile est adaptée au genre de vol de l'oiseau. L'aile du rapace voilier est faite pour utiliser les vents de faible intensité et à faibles oscillations. Celle du voilier marin, au contraire, est appropriée à des vols dans les vents dont les oscillations sont à très grande amplitude. En outre, la queue des rapaces a une grande surface et joue le rôle d'une troisième surface portante quand elle est déployée, comme c'est le cas pendant le vol à voile.

Par contre, les colombins ont une petite surface et une petite envergure relatives d'ailes. Tout en étant capables d'effectuer des planements de courte durée lorsque leur vitesse est suffisante ils ne peuvent progresser que grâce à des battements rapides. Ce sont de vrais rameurs alors que les voiliers ne battent des ailes qu'en l'absence de tout vent.

Aussi on peut remarquer que les muscles moteurs de l'aile sont très développés chez les colombins, alors qu'ils sont beaucoup plus petits chez les voiliers.

J'ai montré, en outre, que les ailes des oiseaux des groupes ci-dessus présentent d'autres particularités que des différences de surface.

L'AILE DES OISEAUX VOILIERS

Les ailes offrent une épaisseur variable suivant les groupes et, par conséquent, les modes de vol. En section, une aile montre à la partie moyenne de l'éventail un bout arrondi, à l'avant, une courbure inférieure concave et une courbure supérieure qui s'élève d'abord assez rapidement pour se rabattre ensuite selon un arc plus allongé, après avoir fait au point de cette inflexion un angle plus ou moins important. À ce point se trouve la plus grande épaisseur de l'aile, son maître-couple qui est plus élevé au niveau du coude qu'au niveau de l'articulation de la main. L'aile a, en outre, une conformation spéciale; elle diminue d'épaisseur depuis le corps jusqu'à son extrémité libre et aussi depuis son maître-couple jusqu'à son bord de fuite où elle est mince.

Les recherches que j'ai faites prouvent que les voiliers ont l'aile très épaisse, comparativement aux autres oiseaux; celle-ci se révèle la plus épaisse chez l'Albatros où elle est, près du corps, égale au tiers de la largeur de l'aile; elle possède la même épaisseur relative chez la plupart des rapaces voiliers, mais étant donné la profondeur des ailes, elle n'est plus alors égale qu'au septième de la largeur de l'aile.

En outre toutes les ailes d'oiseaux lorsqu'elles sont étendues en dehors du vol, quand l'animal est appuyé sur le sol par ses pieds par exemple, sont concaves en dessous, quelle que soit leur forme. La concavité longitudinale bien que très nette n'est jamais très forte. La concavité transversale par contre est variable. Examinée sur sa face inférieure une aile montre d'abord un plan résistant peu profond, puis viennent les rémiges secondaires qui sont toujours arquées vers le bas et font avec le premier plan un angle plus ou moins accentué. Pour les rapaces voiliers et les colombins cet angle est grand, de 150° au moins auprès du corps.

Au contraire, pour les espèces aquatiques qui vivent dans les grands courants d'air, l'angle est beaucoup plus petit, toujours inférieur, d'après mes propres recherches, à 140° . Chez les grands voiliers, comme l'Albatros, la Frégate, le Fou, cet angle est tout près de l'articulation du coude de 125° , ce qui fait qu'à cet endroit l'aile paraît très arquée vers le bas et présente étalée et au repos, étant donnée son étroitesse, la forme d'une gouttière.

Cet angle est plus obtus, à mesure que l'on se rapproche de la pointe de l'aile. J'ai recherché qu'elle était en plusieurs points, la flèche de l'aile de quelques voiliers, c'est-à-dire la plus grande distance qui sépare la corde de l'aile de sa surface ventrale, la corde étant ici, comme dans les avions, la droite qui joint

les extrémités de la courbe de profil que l'on obtient en coupant l'aile par un plan parallèle à l'axe longitudinal de l'oiseau. Voici les chiffres que j'ai trouvés :

	RAPPORT DE LA FLECHE à la corde de l'aile		
	au niveau de l'articulation du coude	au niveau de l'articulation de la main	au niveau de la région médiane du fouet
A. Voiliers marins			
Albatros hurleur, <i>Diomedea exulans</i> L.....	1 4,3 1	1 6,5 1	1 11 1
Fregate, <i>Fregata aquila</i> (L.).....	— 5,7 1	— 6,4 1	— 14,5 1
Fou de bassan, <i>Sula bassana</i> (L.)	— 4,4	— 5,3	— 15
B. Voiliers terrestres			
Pygargue, <i>Haliaëtus albicilla</i> (L.).....	1 9 1	1 10,5 1	1 21 1
Condor, <i>Sarcophamphus gryphus</i> (L.).....	— 8 1	— 11 1	— 14 1
Gypaète, <i>Gypaëtus barbatus grandis</i> . Storr.	— 9,3	— 11,2	— 16

Il résulte de ces chiffres que l'aile est à peine concave en dessous dans la région du fouet. Sa courbure se précise, à mesure qu'on se rapproche du carpe et devient de plus en plus forte aussitôt qu'on s'éloigne de cette articulation vers le corps de l'oiseau; on fait la même constatation d'ailleurs chez tous les oiseaux et cela quelle que soit l'importance de la courbure de l'aile, mais on constate par contre que les ailes des voiliers marins ont une flèche relative plus grande que celle des rapaces voiliers, qu'elles sont beaucoup plus creuses chez les premiers que chez les seconds.

J'ai cherché aussi à déterminer l'angle d'attaque de l'aile dans les deux groupes d'oiseaux voiliers. J'appelle angle d'attaque chez l'oiseau, l'angle que fait la corde de l'aile avec le grand axe du corps. Voici les angles que j'ai trouvés, suivant la portion de l'aile examinée, pour quelques espèces de voiliers, reposant à terre sur leurs pattes et les ailes étendues.

	ANGLE D'ATTACHE D'AILLES ÉTENDUES sous traitées à toute influence extérieure		
	au niveau de l'articulation du coude	au niveau de l'articulation de la main	au niveau de la région médiane du fouet
A. Voiliers marins			
Albatros hurleur, <i>Diomedea exulans</i> L.....	26°5	18°	5°5
Fregate, <i>Fregata aquila</i> (L.).....	23°	15°	6°
Fou de bassan, <i>Sula bassana</i> (L.).....	28°	18°	5°
B. Voiliers terrestres			
Pygargue, <i>Haliaëtus albicilla</i> (L.).....	11°5	9°	7°
Condor, <i>Sarcophamphus gryphus</i> (L.).....	12°	8°5	6°5
Gypaète, <i>Gypaëtus barbatus grandis</i> . Storr..	11°	8°	6°5

On remarque tout d'abord que l'inclinaison de l'aile sur le grand axe du corps n'est jamais constante sur toute la longueur de l'envergure; elle va en diminuant depuis le corps jusqu'à l'extrémité; elle est plus ou moins accentuée jusqu'au niveau de l'articulation de la main et beaucoup plus faible dans la région du fouet quel que soit le voilier examiné. Par contre cette inclinaison est considérable chez les Palmipèdes marins comparativement à ce qui existe chez les Rapaces, l'angle d'attaque se révélant d'autant plus grand que la courbure de l'aile est plus forte et la flèche plus longue.

Mais les ailes observées dans ces conditions ne supportent pas le poids du corps et peuvent être considérées comme soustraite à toute action extérieure. Bien qu'étaillées, elles sont en fait au repos.

Lorsque l'oiseau vole, l'aile subit des déformations particulières qui ont pour résultat de modifier considérablement l'aspect qu'elle présente en dehors de toute influence.

C'est ainsi que les courbures très accentuées qu'offrent au repos les ailes des

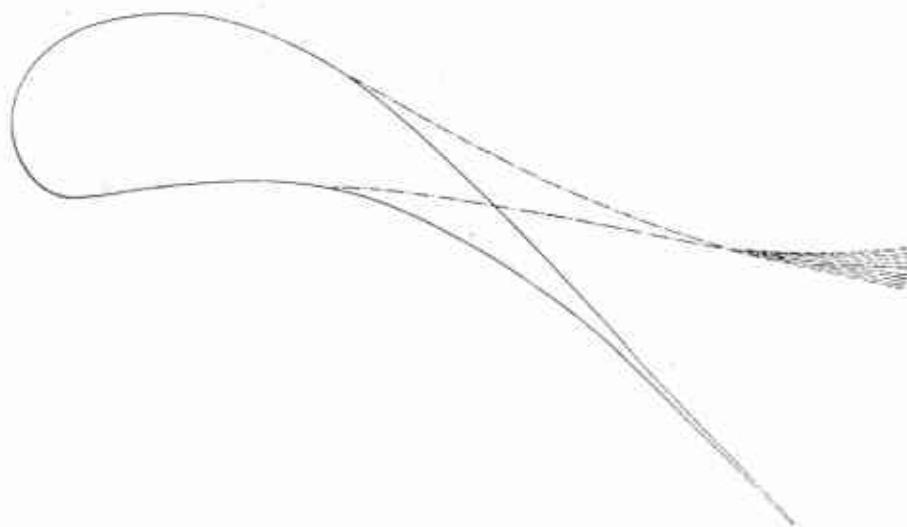


Fig. 13. — Section antéro-postérieure d'une aile de Frégate dans la région proche du corps, montrant les déformations qu'elle subit pendant le vol et les vibrations qui se produisent au bord de fuite sous l'action des pulsations du vent.

Palmipèdes voiliers, surtout d'avant en arrière, s'atténuent considérablement pendant le vol à voile au cours duquel ces ailes ont à supporter le poids du corps et sont soumises à l'action du vent. Tout d'abord, la courbure longitudinale apparaît inversée à l'extrémité du fouet; il en est de même à la partie postérieure de l'éventail. L'aile montre alors une double courbure nouvelle dans les deux sens. Dans le sens latéral il existe toujours dans la partie de l'éventail une concavité peu accentuée tournée vers le bas, alors que dans la région du fouet cette concavité est inversée et tournée vers le haut. Dans le sens longitudinal, c'est-à-dire d'avant en arrière, la même aile dont les rémiges secondaires sont soulevées sous la pression de l'air, présente aussi une double courbure caractéristique. Ses deux tiers antérieurs restent en partie fixes par suite de la rigidité des masses osseuses du membre supérieur et de la rigidité des canons à cet endroit et conservent la forme d'une gouttière dont la concavité regarde en bas. Par contre le tiers

postérieur de l'éventail se relève de manière à offrir une légère concavité tournée vers le haut.

Cette double torsion se retrouve chez tous les oiseaux voiliers pendant le vol et mérite de retenir l'attention; elle a pour effet entre autres de diminuer au cours du vol l'angle d'attaque de façon considérable et cela quelle qu'en soit la grandeur au repos. De plus chez les voiliers, chez les Palmipèdes marins surtout, cet angle s'efface d'autant plus que le vent est plus violent et de ce fait, il se produit un phénomène particulier qui a son importance. En raison de l'élasticité des plumes de l'aile, cet angle est constamment différent pendant le vol à voile en ce qui concerne les rémiges secondaires; il diminue automatiquement quand la vitesse du vent croît et il augmente de même quand celle-ci décroît. Pour ce qui est des rémiges primaires, il se produit des oscillations de leurs extrémités dans le sens vertical qui font sans cesse varier la courbure de la concavité qu'elles dessinent et qui est tournée alors vers le haut. De ce fait, l'extrémité des rémiges primaires de l'aile, ainsi que la partie postérieure de l'éventail, vibrent de façon continue sous l'action du courant d'air. En effet ces portions de l'aile battent constamment au cours d'un vol à voile, s'é�èvent et s'abaissent sans cesse, avec une amplitude et une fréquence qui sont indiscutablement liées à celles des pulsations rapides du vent, par suite de l'énergie que ces oscillations fines sont capables de fournir. (fig. 13)

Pour mieux comprendre l'importance de ces vibrations, une étude de la plume était intéressante à faire.

LES REMIGES DES OISEAUX VOILIERS

Examинées au point de vue extérieur, les plumes des Rapaces voiliers offrent un aspect particulier. Les rémiges primaires, larges à leur base, ont leurs barbes rétrécies à leurs extrémités; c'est pour cette raison qu'elles laissent entre elles des espaces interdigités; les régimes secondaires, par contre, ont des barbes qui sont très développées et qui offrent partout sensiblement la même largeur.

Les plumes alaires des voiliers marins sont différentes; la forme des rémiges primaires est effilée et rappelle celle d'un couteau pointu; les rémiges secondaires sont, par contre, peu développées. De plus, ces plumes paraissent plus petites, proportionnellement, que chez les rapaces voiliers. On peut se rendre compte de toutes ces différences en rapportant la surface réelle des barbes à la racine cubique du poids du corps de l'animal porté au carré, la longueur réelle des plumes à la racine cubique de ce poids, ou en photographiant les rémiges de divers voiliers et en les ramenant ensuite aux dimensions qu'elles auraient si tous les oiseaux pesaient le même poids. On voit par l'examen des figures 14 et 15 que ces plumes sont de grandeurs relatives très différentes, comme la surface de leurs barbes, d'ailleurs.

Les rémiges primaires des Rapaces voiliers sont un tiers plus longues que celles des voiliers marins; les rémiges secondaires des premiers sont deux fois et demi plus longues et deux fois plus larges que celles des seconds; pour cette raison, le nombre de ces rémiges secondaires est différent suivant les groupes: il est d'une quarantaine environ chez les voiliers marins et d'une vingtaine seulement chez les Rapaces voiliers.

Si l'on ramène toutes ces plumes à la même longueur, on voit, en outre, que la courbure des rémiges primaires est sensiblement la même dans les deux groupes de voiliers. Au contraire, les rémiges secondaires ont une courbure très différente; celle des Rapaces est peu accentuée alors que celle des voiliers marins l'est beaucoup plus et rappelle la courbure générale de l'aile (fig. 16 et 17).

Si l'on effectue des coupes transversales dans le canon des rémiges, à diverses hauteurs, on constate, tout d'abord, que le canon, aux endroits privés de barbes, est

creux et offre une section de forme elliptique, le grand axe de cette ellipse étant perpendiculaire au plan de l'aile. Par suite de cette conformation, la plume est

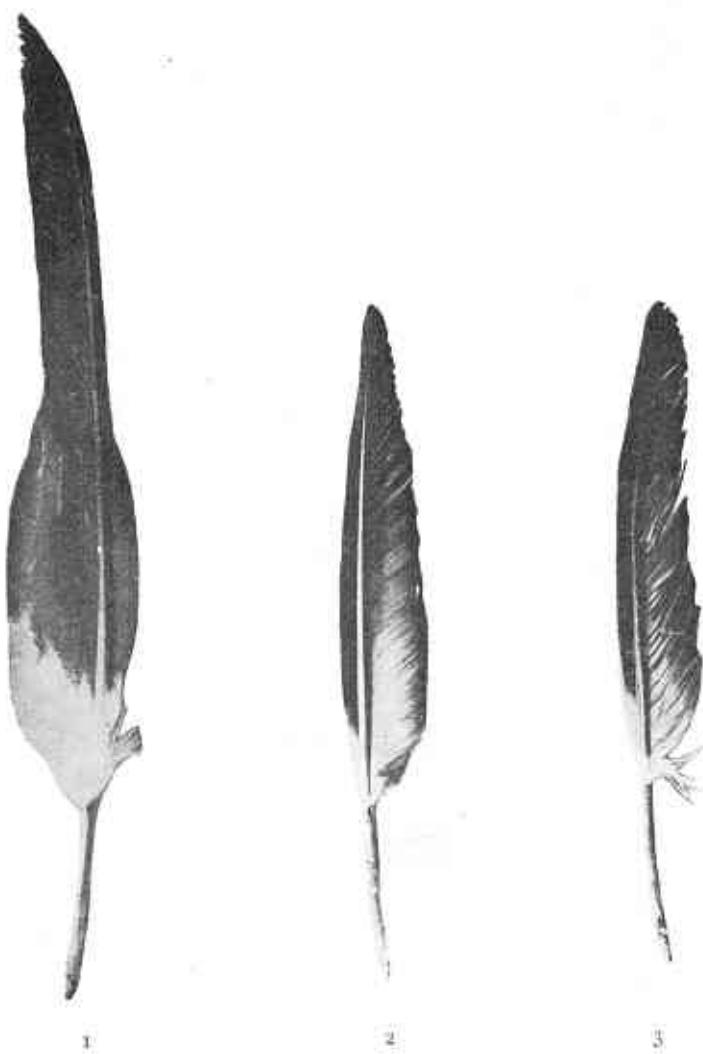


Fig. 14. — La longueur relative des grandes rémiges primaires de l'aile chez les voiliers.

1. — Aigle fauve. *Aquila chrysaetos* (L.), Rapace voilier.
2. — Fou de bassan. *Sula bassana* (L.), Palmipède voilier.
3. — Albatros. *Diomedea albatrus*. Pall. Palmipède voilier.

(Les longueurs réelles de ces rémiges ont été ramenées à celles qu'elles auraient si tous les oiseaux pesaient 1 gramme et grandies 4 fois.)

plus difficile à fléchir suivant ce grand axe. Par contre, les sections du canon, faites dans la portion de la plume où il y a des barbes, sont sensiblement quadrangulaires ; les côtés de ce quadrilatère, qui sont en matière cornée comme la paroi elliptique du canon et qui correspondent aux faces supérieures et inférieures de la plume sont



Fig. 15. — La longueur relative des rémiges secondaires de l'aile.
 1. Aigle fauve : *Rapace voilier*. — 2. Fou de bassan : *Palmipède voilier*.
 3. Albatros : *Palmipède voilier*.

(Les longueurs réelles de ces rémiges ont été ramenées à celles qu'elles auraient si tous les oiseaux pesaient 1 gramme et grandies 4 fois.)



Fig. 16. — La courbure des rémiges primaires de l'aile chez les voiliers.
 1. Aigle fauve : *Rapace voilier*. — 2. Albatros : *Palmipède voilier*.
 3. Fou de bassan : *Palmipède voilier*.

(Toutes les plumes ont été ramenées à la même taille.)



Fig. 17. — La courbure des rémiges secondaires de l'aile chez les goéliers.

1. — Aigle fauve : Rapace voilier.
 2. — Albatros : Palmipède voilier.
 3. — Fou de bassan : Palmipède voilier.
- (Toutes les plumes ont été ramenées à la même taille)



(Cl. Planiol et Magnan)

Fig. 18. — Sections pratiquées dans le canon d'une rémige primaire de Fou de bassan, Palmipède voilier, grandies 5 fois, la plus petite à 1 cm. de l'extrémité, les autres tous les 3 cm à partir de la plus petite section (la face ventrale du canon est tournée vers le bas).

beaucoup plus épaisses que les deux autres côtes très amincies. De plus, ces sections montrent que la partie centrale du canon est remplie par une substance assez molle ressemblant un peu, comme consistance, à la moëlle du sureau, mais plus dure (fig. 18).

Les qualités de ces plumes méritaient aussi d'être étudiées. Pour définir ces qualités, M. Planiol et moi, nous avons voulu rechercher quel était l'amortissement et la flexibilité des plumes d'oiseaux voiliers.

Ces essais sommaires ont porté sur des rémiges primaires et secondaires de Fou de Bassan [*Sula bassana* (L.)] Palmipède marin voilier et d'Aigle fauve [*Aquila chrysaëtus* (L.)] Rapace voilier. Ils ont eu pour but d'examiner comment se com-

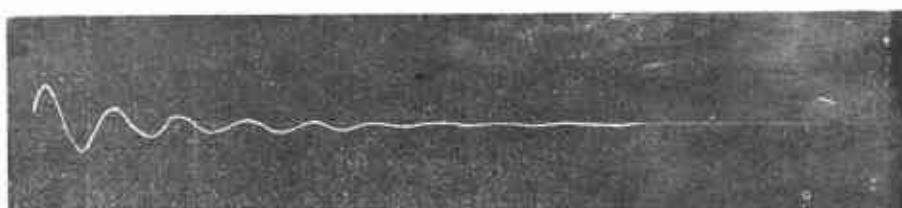


Fig. 19. — Mouvement amorti d'une rémige primaire complète de Fou de bassan (longueur 34 cm.).

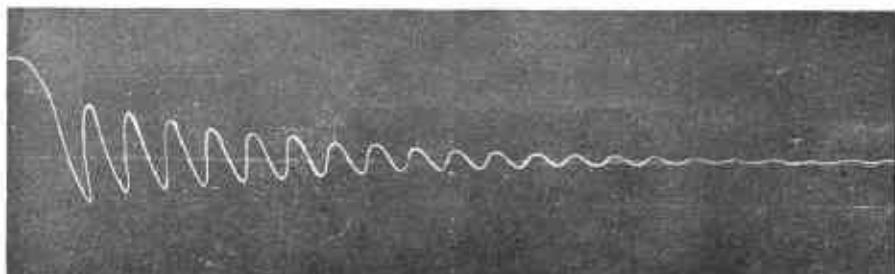


Fig. 20. — Mouvement amorti du canon ébarbé de la même rémige primaire de Fou de bassan.

portent, en gros, les plumes principales de l'aile sous l'effet de flexions statiques et dynamiques.

La méthode employée pour étudier les oscillations des rémiges a consisté à fixer, d'une façon absolument rigide, la partie naturellement dénudée du canon de la plume, soit en la noyant dans la cire à cacheter, soit en la serrant dans des mâchoires en bois taillées spécialement. La longueur ainsi encastrée fut voisine d'un cinquième de la longueur totale du canon.

Cette façon de faire a l'inconvénient de ne laisser libre qu'une partie du canon et, par suite, de modifier la flexibilité et la période de la portion restée libre. L'examen des plumes montre, cependant, que cet inconvénient n'est pas aussi grave qu'on pourrait le craindre *a priori*, la partie de la plume voisine des masses osseuses sur un tiers au moins de sa longueur pouvant être considérée comme presque entièrement rigide vis-à-vis du reste.

La plume étant ainsi fixée est montée sur un enregistreur à tambour analogue à ceux employés par les physiologistes, mais susceptible d'une vitesse plus considérable, allant jusqu'à 500 m/m sec. L'enregistrement a été fait sur noir de fumée, au moyen de styles de nature variée : les meilleurs tracés ont été obtenus avec des cheveux. La plume, écartée de sa position d'équilibre, était abandonnée brusquement

à elle-même et le style, en cheveu, traçait la courbe des oscillations amorties. La même plume était ensuite remise en expérience après avoir été soigneusement débarrassée de toutes ses barbes au moyen d'un rasoir.

Les essais ont eu pour premier résultat de montrer que la plume entière est plus rapidement amortie que le canon seul privé de ses barbes.

La comparaison des tracés a fait voir clairement, ce que l'on pouvait attendre *a priori*, que la presque totalité de l'amortissement du mouvement de la plume était due à la résistance de l'air sur les barbes ou aux frottements développés entre celles-ci par leurs mouvements relatifs.

Encore convient-il d'observer que les tracés ne donnent qu'une idée incomplète de la différence des amortissements entre le mouvement de la plume complète et celui de son canon ébaillé. En effet, le frottement du style, ne fut-il composé que d'un cheveu, est loin d'être négligeable ainsi que l'a fait voir la juxtaposition de différents tracés; ensuite, la période d'oscillation diminuant beaucoup lors de l'enlèvement des barbes, il en résulte une augmentation de tous les frottements, ce qui a pour effet de limiter à nouveau la décroissance de l'amortissement.

Malgré cela, cette décroissance est cependant considérable. Pour une rémige primaire de fou de Bassan, par exemple, le nombre d'oscillations complètes nécessaire pour réduire à $1/10^{\circ}$ de sa valeur l'amplitude du mouvement est de 4 à 4,5 avec les barbes et de 14 à 16 sans les barbes, soit de 3 à 4 fois plus (fig. 19 et 20).

Il est vraisemblable que si l'on observait les vibrations du canon de la plume seul, amorti par ses seuls frottements internes, c'est-à-dire oscillant dans le vide, on trouverait un amortissement encore beaucoup plus faible.

Une telle étude ne serait possible que par des méthodes photographiques qu'il ne nous a pas été possible de mettre en œuvre et qui, seules, permettraient, par leur précision, de dégager de la connaissance de l'amortissement les lois régissant les frottements dont il résulte.

Son seul intérêt serait de démontrer expérimentalement le fait que la matière constituant les canons des rémiges est douée d'une grande élasticité et de faibles frottements internes.

L'examen de ces canons suffit à le faire admettre qualitativement et les essais ci-dessus justifient assez cette idée pour être en droit de penser que dans la construction d'un élément d'aile d'avion imitant les propriétés de l'aile d'oiseau, il n'y aurait pas lieu de chercher à amortir les mouvements de flexion de la membrure de l'aile.

Les tracés utilisés pour l'étude de l'amortissement ont permis de connaître avec une bien plus grande précision la fréquence des vibrations des différentes plumes observées. Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Oiseau	Nature de la plume	Long. en cm	Poids en grammes P_1 avec barbes P_2 sans barbes	Fréquences η_1 avec barbes η_2 sans barbes	Surface des barbes de la plume cm ²
Fou de Bassan	Rémige primaire .	34	1,85	1,15	36,3 54,5 77
" "	Rém. secondaire .	15,2	0,21	0,12	38,3 83 25
Aigle Fauve	Rémige primaire .	51,5	3,8	2,5	13,3 24 177
" "	Rém. secondaire .	38	2	1,3	14,7 45 145

La valeur élevée des fréquences observées ci-dessus permet de répondre à la question de savoir si les ailes formées de semblables plumes sont aptes à suivre fidèlement les pulsations rapides de la vitesse du vent. Ce point ne paraît pas devoir être mis en doute, les périodes des susdites plumes complètes variant entre $1/13^{\circ}$ et $1/40^{\circ}$ de seconde, durées très inférieures à celles des pulsations les plus rapides observées jusqu'ici.

Pour l'étude de la flexibilité des rémiges, la plume ébarbée fixée ainsi qu'il a été dit, était placée sa concavité vers le haut, de façon que la partie encastrée fut sensiblement horizontale. Des marques étaient faites de distance en distance sur la plume, à des intervalles connus, et la plume était mise en charge au moyen de cavaliers ou de poids suspendus à des fils.

La position de la plume était réglée de façon que sous la charge sa tendance à

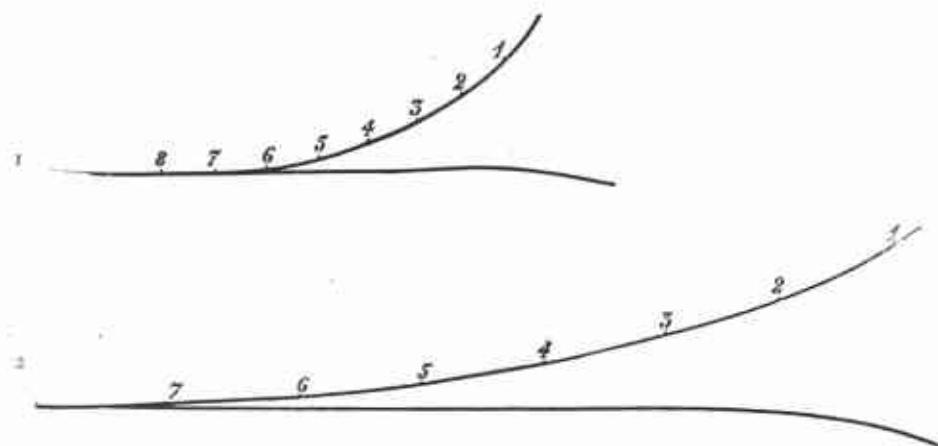


Fig. 21. — Déformations du canon d'une rémige secondaire (1) (long. 15 cm²) et du canon d'un rémige primaire (2) (long. 34 cm) de Fou de Bassan sous l'action d'une charge de répartition à peu près uniforme. Les rémiges ont leur face ventrale tournée vers le haut et leur extrémité libre tournée vers la droite. En outre la rémige primaire n'a pas été reproduite complètement ; il manque sur la gauche une partie du canon égale au 1/4 de sa longueur totale.

fléchir, en dehors du plan vertical des forces, fut minime. Cette condition demande quelques tâtonnements pour être remplie, car la flexibilité de la plume semble ne pas être la même dans tous les plans. Il en résulte que la plume a tendance à sortir du plan vertical moyen — si tant est que l'on puisse parler du plan moyen d'une courbe gauche. Cette expression incorrecte s'explique par le fait que si les canons des plumes sont, en général, gauches, ils sont cependant peu éloignés d'une courbe plane ; c'est dans le plan de cette courbe que nous avons essayé, autant que possible, de déformer le canon.

L'un des contours apparents du canon était alors visé au cathétomètre, en un nombre de points de repère convenable, aussi bien avant qu'après la mise en charge. On pouvait ainsi, en supposant le canon resté plan, reconstruire sur un graphique la forme de la courbe de la plume au repos et en charge. Les résultats les plus intéressants ont été obtenus avec une rémige primaire de Fou de Bassan dont le canon avait 34 cm. de long et pesait 1 gr. 15. Sept cavaliers lui furent suspendus pesant chacun 10 gr., régulièrement espacés de 3 cm. 3, le premier à 1 cm. de l'extrémité trop faible pour le porter.

On se rapprochait ainsi grossièrement d'une charge de 70 gr. uniformément répartie sur les deux tiers du canon, soit à peu près sur la région à laquelle les barbes transmettent réellement la poussée de l'air en cours de vol.

Dans ces conditions, la plume prenait une forme à double courbure, la courbure la plus rapprochée de l'extrémité sensiblement plus accentuée que l'autre (fig. 21). De la connaissance des deux courbes, avant et après déformation, on peut tirer, quoique grossièrement — puisque cette opération équivaut à une double dérivation graphique

— la connaissance des rayons de courbure en chaque point. Or, la relation $\frac{t}{\rho} = \frac{M}{EI}$, liant les courbures $\frac{1}{\rho}$ et $\frac{1}{\rho'}$, en un même point, avant et après la déformation, au moment fléchissant en ce point M d'une part et au produit du moment d'inertie I de la section en ce point par le module d'Young E, d'autre part, ce produit peut être calculé dans le cas présent puisque les moments fléchissants sont connus.

Cette opération a été faite et donne les résultats suivants :

Pourcentage de la longueur comptée de la pointe à la section considérée	Moment fléchissant en ce point (en grammes et centimètres)	$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'}$	Produits E. I.
0,09	16,5	0,1230	130
0,18	66	0,0500	1300
0,27	148	0,0260	5700
0,37	253	0,0120	20000
0,46	401	0,0185	22000
0,56	582	0,0118	45000
0,66	796	0,0118	68000

De la connaissance du produit E I en un point et de la section en ce point, on peut tirer — très grossièrement — une valeur de module d'Young E, en calculant le moment d'inertie I de la section considérée. Ce calcul fait pour quelques-unes des sections a donné des résultats variant de 500 à 650 kilos par millimètre carié, chiffre d'un ordre de grandeur admissible puisque l'on attribue à la baleine, matière organique assez comparable, somme toute, avec celle qui forme les canons des plumes, une valeur de E d'environ 600 kg. par m/m².

Une opération identique a été faite avec une rémige secondaire de Fou de bassan longue de 15 cm. 2 et pesant 0 gr. 12. 8 cavaliers d'un poids de 3 gr. chacun lui furent suspendus, le premier à 1 cm. 5 de l'extrémité, les suivants à 1 cm. 5 les uns des autres; cet essai a montré que cette rémige prenait comme la rémige primaire une forme à double courbure (fig. 21).

Le point le plus remarquable observé au sujet de la flexibilité des plumes est l'extrême souplesse de leur pointe. À l'extrémité, le moment d'inertie I de la section tombe à 1/10.000^o ou même moins de sa valeur maxima. D'autre part, la légèreté et le manque de cohésion des barbes de la plume confèrent à l'extrémité de sa surface une souplesse qui paraît inimitable par les procédés de construction employés pour l'aviation.

Aucune nervure entoilée ne peut allier à une résistance suffisante une aussi admirable élasticité dont il faudra évidemment se contenter d'approcher dans la mesure du possible, c'est-à-dire de très loin.

L'AVION VOILIER

Il est cependant possible à l'homme d'imiter l'oiseau et de pratiquer comme lui le vol à voile par l'utilisation de tous les vents, comme je l'ai montré dès 1914. Les performances réalisées en 1922 en particulier, par des pilotes d'avions sans moteur, à l'aide des vents ascendants dynamiques, nous fournissent la preuve de cette possibilité; elles constituent une première étape dans cette voie. J'affirme, et en cela je prétends ne pas être téméraire, que d'ici quelques années, le moyen aura été définitivement trouvé de se servir des vents ascendants d'origine thermique et aussi des vents dits horizontaux et par conséquent des rafales.

Il existe, en effet, trois sortes de vents utilisables pour l'avion voilier :

1° Les vents ascendents dynamiques ; 2° les vents ascendents thermiques ; 3° les vents horizontaux à rafales.

Mais dès maintenant, il faut affirmer bien haut qu'aucun résultat sérieux ne pourra être obtenu par empirisme. Si nous voulons voler à voile, à notre volonté, il est indispensable de travailler avec méthode et d'effectuer les recherches de laboratoire sans lesquelles il paraît difficile de connaître les conditions dont dépend le succès.

Pour voler à voile, je le répète à nouveau, il faut réunir trois conditions. Il faut : 1° avoir un avion voilier approprié ; 2° avoir à sa disposition un vent déterminé ; 3° savoir piloter l'appareil dans un tel vent.

L'avion voilier ne doit pas être conçu et construit dans la fantaisie. Tout d'abord, le vol à voile étant nettement fonction de la finesse de l'appareil, il y a un gros intérêt à supprimer toutes les résistances parasites et en particulier à supprimer les trains d'atterrissement qui existent sur les avions à moteur ; il y a, en outre, avantage à donner à ces appareils et surtout au fuselage des formes offrant la moindre résistance à l'avancement et à construire des monoplans sans haubans munis d'ailes épaisses à profil varié, qui paraissent vraiment nécessaires pour la réalisation du vol à voile et qui permettent, de plus, d'obtenir des surfaces portantes beaucoup plus solides.

Il y a lieu de bien se convaincre aussi que les ailes qui sont employées sur

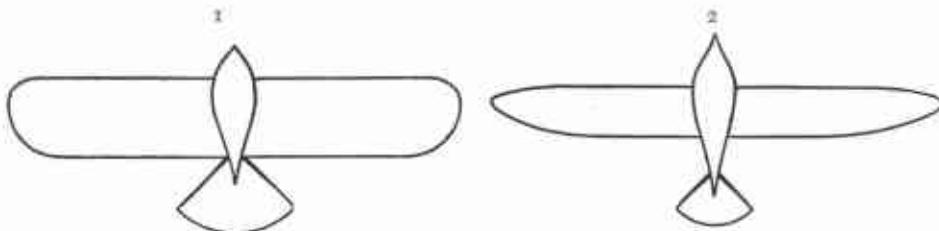


Fig. 22. — Forme et caractéristiques d'un avion voilier

1. destiné à voler au moyen des vents horizontaux ou ascendants dynamiques faibles, ou des courants ascendants thermiques

2. destiné à voler au moyen des vents horizontaux ou ascendants dynamiques forts

les avions à moteur ne sont pas propres au vol à voile et que pour ce mode de vol nouveau, il faut concevoir des ailes de forme nouvelle, copiant d'aussi près que possible celles des oiseaux voiliers, qui ainsi que je l'ai mis en évidence, sont douées d'une grande flexibilité à leur extrémité et sur leur tiers postérieur. L'aile souple, élastique, seule en effet est capable de s'adapter automatiquement aux variations du vent, de posséder au moment voulu et automatiquement la meilleure incidence pour un vent et une rafale déterminées.

Ce résultat ne peut être obtenu que par une imitation très approchée de l'aile de l'oiseau voilier, que par une copie aussi servile que possible de la partie de l'aile, dont j'ai indiqué le rôle primordial dans la réalisation du vol à voile, du canon de la plume dont M. Planiol et moi avons montré les qualités. C'est donc vers la construction de nervures de conception nouvelle, possédant à leur extrémité libre une flexibilité et une élasticité particulières, analogues à celles qu'on rencontre dans la plume des oiseaux, qu'il faut s'orienter. Mais il existe de sérieuses difficultés à réaliser une aile qui réponde à toutes les nécessités, et il est certain que le problème ne pourra être résolu qu'après des études précises de laboratoire.

Enfin, un même appareil ne peut être destiné à la pratique du vol à voile, quel que soit le vent utilisé. Selon le vent qu'on aura à sa disposition, on devra

construire un type d'avion voilier spécial. Si l'on désire voler au moyen de vents horizontaux ou ascendants dynamiques faibles ou des vents thermiques, il est nécessaire de donner à l'engin des caractéristiques très voisines de celles des Rapaces voiliers. Si l'on veut se servir des vents horizontaux ou des vents ascendants dynamiques forts qui conservent la structure des premiers, sont aussi agités et de ce fait ont une action analogue, mais dans une autre direction de l'espace, il est indispensable d'avoir un avion dont les caractéristiques seront les mêmes que celles des oiseaux marins voiliers. Par conséquent, dans le premier cas, il faudra posséder un avion voilier à ailes longues et larges, à faible courbure et pourvu d'une queue de grande surface; dans le second cas, il faudra avoir un appareil à ailes longues et étroites, à courbure accentuée, avec une queue de peu d'étendue (fig. 22). Dans tous les cas, par contre, le centre de gravité de l'avion devra être en dessous des ailes.

Il y a aussi un grand intérêt à ne pas réaliser des voiliers à trop grande surface portante, par rapport au poids de l'avion en ordre de marche. L'expérience montre, en effet, qu'un appareil trop faiblement chargé au mètre carré ne vole pas de façon satisfaisante. Il ressort de mes essais qu'un avion voilier pour vents faibles ou thermiques doit supporter pour un poids en vol de 150 kilos une charge de 14 kilos au moins et qu'un engin destiné à voler dans les vents violents se maintient d'autant mieux dans l'air agité que sa charge pour le même poids de 150 kilos est voisine de 20 kilos au mètre carré. Pour ces raisons, il y a avantage à donner à de tels appareils un poids de 80 kilos au moins sans le pilote, ce qui permet de lui assurer la solidité indispensable et, par conséquent, un coefficient de sécurité convenable, car il ne faut pas oublier que, dans le vol à voile par vent fort, l'avion et les ailes surtout sont soumis, de la part de ce vent, à des efforts considérables, auxquels ces ailes sont incapables de résister si elles ne sont pas bien construites. C'est pourquoi il est utile de soumettre tout voilier à des essais statiques qui, cependant, doivent être effectués différemment que pour les avions ordinaires, par suite de la flexibilité de l'aile.

Pour faire du vol à voile, la seconde condition nécessaire est d'avoir à sa disposition un vent favorable. Il y a donc lieu de chercher à être renseigné de manière précise sur la nature des vents et, par conséquent, de fixer les régions où l'on peut rencontrer un vent favorable.

LE PILOTAGE DANS LES COURANTS ASCENDANTS

Une même région ne peut être bonne pour tous les modes de vol à voile. Si l'on veut utiliser les courants ascendants dynamiques, il faut choisir de préférence des contrées où il existe des falaises ou des élévations dont le développement en largeur est aussi étendu que possible, orientées au moment des essais de façon à ce que le vent qui les frappe ait une composante ascendante et une vitesse suffisante pour procurer à l'avion l'énergie capable de le soutenir et même de lui faire gagner de la hauteur.

Si l'on désire se servir des courants thermiques, on doit se rendre de préférence dans les pays chauds, dans les régions désertiques où l'air est ordinairement sillonné par un grand nombre d'oiseaux voiliers.

Enfin, pour faire du vol à voile à l'aide des vents horizontaux, par l'utilisation des rafales, il est indispensable, à mon avis, d'opérer en mer où l'on est plus certain de trouver des vents à grandes variations de vitesse, avec une fréquence plus grande que partout ailleurs.

A l'heure actuelle, le vol à voile par vents ascendants dynamiques paraît le plus facile à réaliser. C'est au moyen de tels vents qu'ont été obtenus les grands vols de cette année. De telles performances peuvent être renouvelées maintenant à

volonté, selon les circonstances, par tout pilote d'avion voilier bien conçu, s'il se résout à ne pas s'écartier de certaines règles que j'ai déjà données et que je rappelle ici.

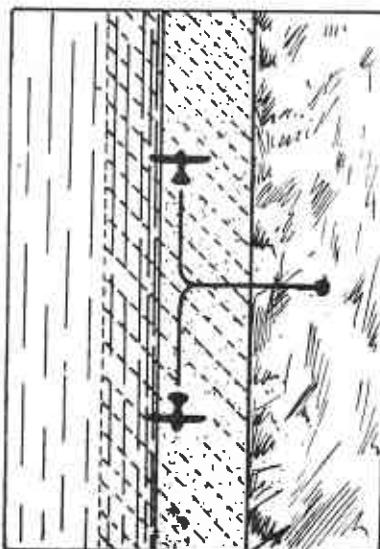
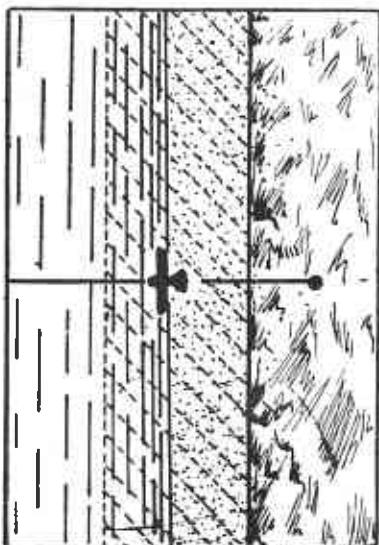
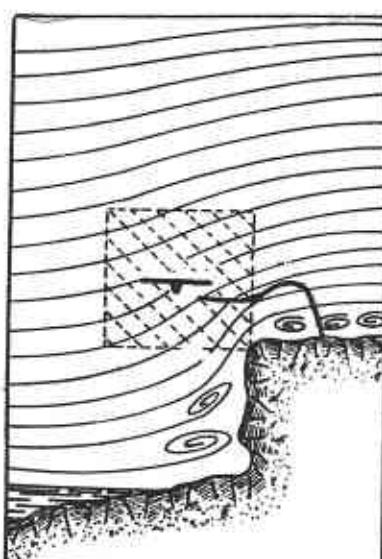
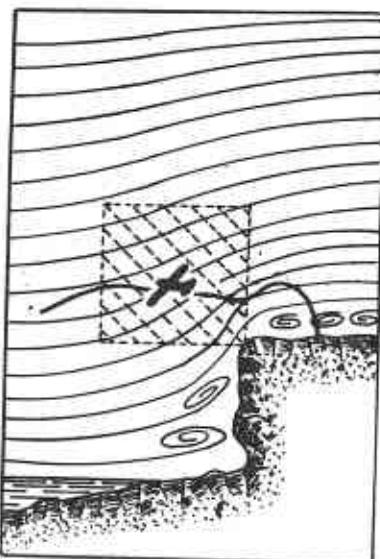


Fig. 23. — Avion voilier partant du sommet d'une falaise et effectuant un vol rectiligne, ce qui a pour effet de lui faire traverser rapidement la zone favorable et de l'obliger à atterrir ou amerrir.

Fig. 24. — Avion voilier partant du sommet de la même falaise et effectuant le virage utile pour rester dans la zone la plus favorable.

Pour l'instant il est préférable de se lancer du sommet des falaises ou des pentes. Comme ces sommets constituent, ainsi que je l'ai indiqué, lors de l'étude des courants ascendants, une zone défavorable pour le vol à voile en raison des

tourbillons, des remous qui existent à ces endroits, on doit avoir recours à un moyen de lancement qui procure à l'appareil une certaine vitesse et qui lui permette de s'élever et de s'éloigner le plus rapidement possible du lieu de départ.

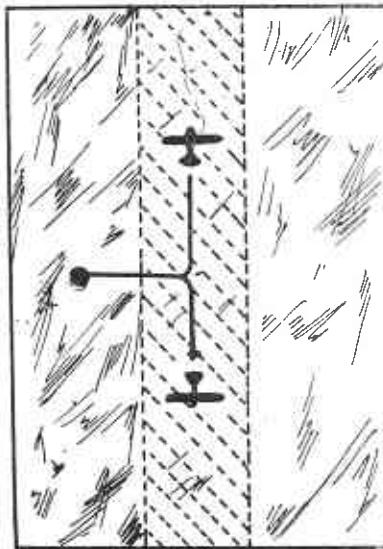
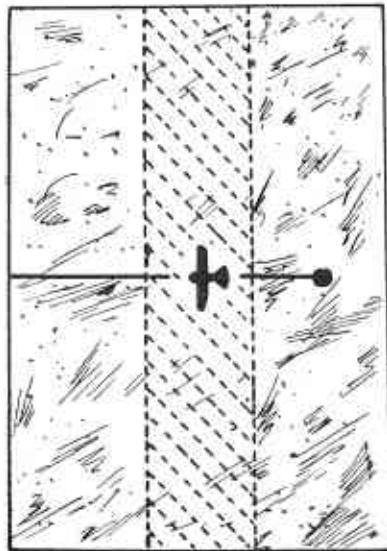
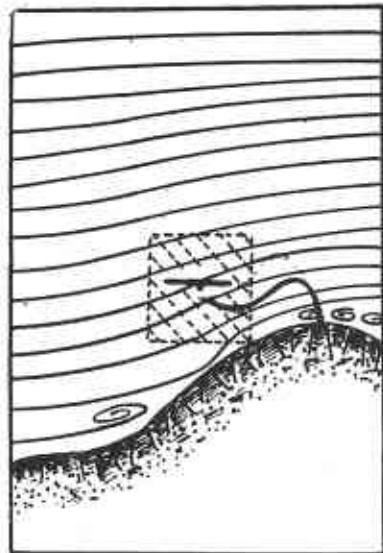
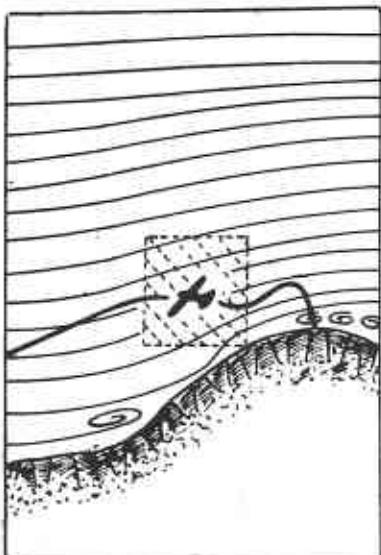


Fig. 25. — Avion voilier partant du sommet d'une pente développée en largeur et effectuant un vol rectiligne qui a pour effet de lui faire traverser rapidement la zone favorable et de l'obliger à atterrir.

Fig. 26. — Avion voilier partant du sommet de la même pente et effectuant le virage nécessaire pour rester dans la zone la plus favorable.

Après le léger gain de hauteur dû au lancement, l'avion voilier qui, je le répète, se trouve dans une zone défavorable, commence à descendre; sa trajectoire est plus ou moins inclinée dans le cas d'une falaise à pic; elle est sensiblement parallèle à

l'inclinaison de la pente si celle-ci n'est pas à pic. Pour pouvoir utiliser sûrement le courant ascendant et voler dans la zone très favorable, il est nécessaire de virer plus ou moins nettement vers la droite ou la gauche après quelques secondes de

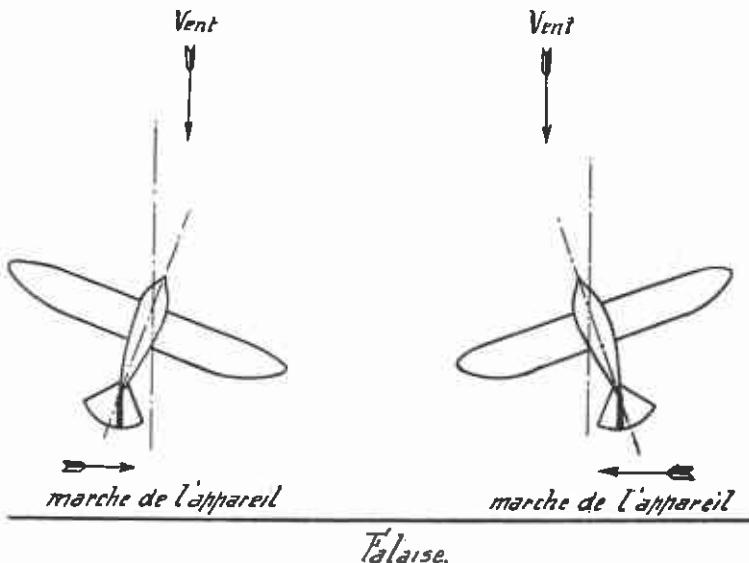


Fig. 27. — Avion voilier se déplaçant latéralement et parallèlement à la crête d'une falaise et exécutant une marche à la crabe

descente planée, de façon à longer la crête de la falaise ou à suivre le tiers supérieur de la pente (fig. 23, 24, 25 et 26). On est certain en opérant ainsi de tomber à coup sûr sur le courant ascendant. Aussitôt, l'appareil prend de la hauteur et s'élève bientôt au-dessus et en avant de son point de départ. Il n'y a plus qu'à

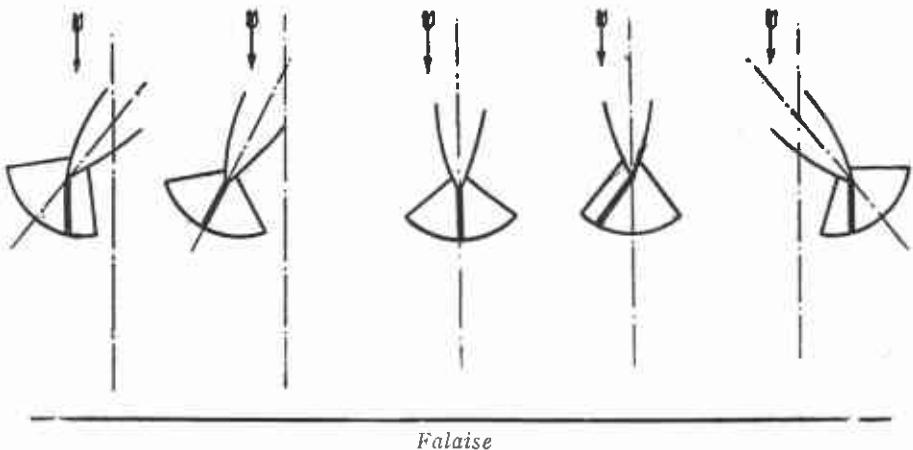


Fig. 28. — Manœuvres à effectuer avec le gouvernail de direction pour exécuter le changement de sens de la marche. Les flèches indiquent la direction du vent

gouverner avec adresse, qu'à décrire des cercles ou des huit dans le but de rester dans la zone sustentatrice, car dès qu'on la quitte, l'atterrissement est obligatoire.

Lorsque le pilote évolue au voisinage d'une falaise à pic, il a avantage à

employer les mêmes procédés que ceux qu'utilisent les oiseaux qui volent dans de tels endroits et que j'ai décrits page 18.

Pour copier cette marche à la crabe, il faut s'efforcer de rester face au vent et par conséquent de tourner le dos à la falaise. Dans ces conditions on obtient le déplacement latéral parallèlement à la crête de la falaise, en tournant son gouvernail de direction d'un angle variable suivant la vitesse du vent, vers la droite si l'on veut aller vers la droite et inversement si l'on veut aller vers la gauche (fig. 27).

Pour changer sa direction, le pilote ne doit pas exécuter de virage, ce qui aurait pour résultat de l'empêcher de recevoir le vent de face. Il lui suffit de donner à son gouvernail une incidence contraire, de le tourner vers la gauche, par exemple, si il se déplace vers la droite. Cette manœuvre a pour effet de changer l'orientation du grand axe de l'appareil et d'assurer une marche en sens inverse de la première (fig. 28).

Mais c'est évidemment une erreur que de vouloir demander au pilote de posséder l'instinct de l'oiseau et de l'obliger à déterminer, par réflexion au cours du vol, les régions où il pourra rencontrer des vents favorables. Le vol à voile ne deviendra vraiment possible, à mon avis, que si on supprime au pilote tout travail cérébral et que si on lui fournit des instruments capables de le renseigner à tout moment sur sa situation dans l'atmosphère.

Pour mes expériences de vol à voile, j'ai imaginé un appareil dont j'ai déjà donné la description et qui annonce, automatiquement, si l'avion monte ou descend, même faiblement. Cet appareil permet au pilote de savoir s'il est toujours dans la zone ascendante ou s'il la quitte; il lui permet donc de prolonger son vol autant qu'il le veut.

La réalisation du vol à voile à l'aide des courants thermiques, qui se forment dans les régions désertiques en particulier, ne paraît pas impossible. Les études et les essais auxquels je me suis livré dans ces contrées m'ont permis de préciser que la vitesse de ces courants étaient en moyenne de 1 m. 50 à la seconde, qu'elle atteignait cependant à peine un mètre en hiver, mais dépassait quelquefois deux mètres en été. De tels courants peuvent donc être utilisés par des avions voiliers à grandes ailes profondes et dont la finesse serait voisine de 1/15". Il est certain qu'un pilote d'appareil très fin devrait réussir à gagner de la hauteur en décrivant, après avoir cabré légèrement son voilier, des orbes successifs, afin de se maintenir dans la zone sustentatrice, ce qui ne semble pas irréalisable s'il existe à bord un indicateur de montée très sensible. On peut même espérer qu'il sera un jour possible, par l'emploi de tels indicateurs, de parcourir le ciel d'un horizon à l'autre, en passant d'une plage où le vent a une composante ascendante à une autre plage identique, étant donné que ces plages sont toujours assez rapprochées, et en s'efforçant de réduire au minimum l'angle de glissement dans les zones non sustentatrices.

Toutefois, le vol à voile à la manière des vautours et des milans ne pourra devenir pratique, qu'à la suite d'études spéciales, car les courants thermiques qui ne se rencontrent que pendant les heures chaudes de la journée, ne sont portants qu'à partir d'une certaine hauteur. Les vautours eux-mêmes sont obligés de battre des ailes quand ils veulent partir de terre, et ce n'est que lorsqu'ils ont atteint une vingtaine de mètres au-dessus du sol que leurs battements se font plus rares pour ne cesser définitivement qu'à une cinquantaine de mètres de hauteur.

Par l'utilisation des courants ascendants dynamiques, on est arrivé à l'heure actuelle à se maintenir en l'air sur un avion sans moteur pendant plus de trois heures, et il n'est pas exagéré de dire qu'avec une connaissance plus approfondie de ces vents et un peu d'entraînement, les pilotes réussiront à voler le long des pentes ou des crêtes des falaises aussi longtemps qu'ils auront à leur disposition un courant à composante ascendante, capable de les soutenir; mais il apparaît dès maintenant, que s'il est possible par ce moyen d'effectuer dans l'atmosphère des vols de longue

durée, il ne peut être question de faire des voyages de grande étendue. Le vol à voile par vent ascendant dynamique sera toujours assez localisé; il ne pourra permettre que des déplacements assez restreints au-dessus des régions montagneuses ou le long des côtes élevées.

Or, il y a intérêt pour l'avenir du vol à voile à ce que le but poursuivi ne consiste pas uniquement à chercher à survoler un point le plus longtemps possible. Le progrès réside, au contraire, dans la réalisation de voyages sur de grandes distances. Seul, le vol à voile pratiqué en se servant des rafales des vents horizontaux peut laisser espérer un tel résultat.

LE PILOTAGE DANS LES VENTS DITS HORIZONTAUX

Comme je l'ai montré page 8, le vent est constamment irrégulier et formé d'oscillations d'amplitude et de période variables. Si l'on se reporte au tracé de

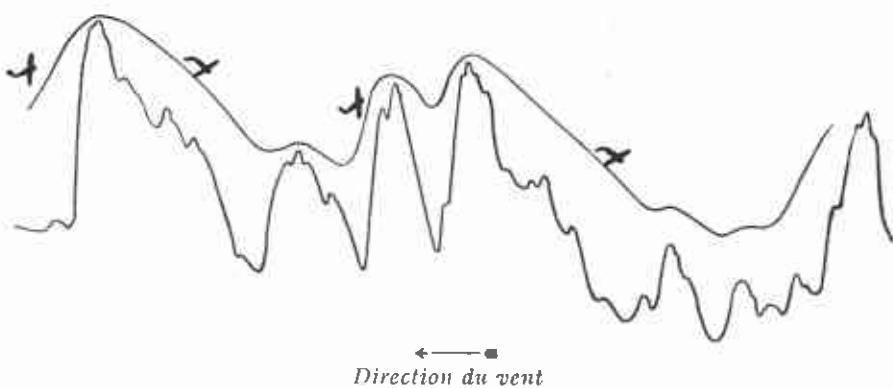


Fig. 29. — Trajectoire d'un avion voilier utilisant les rafales d'un vent horizontal de 8 m. 50 de vitesse maxima.

La vitesse instantanée du vent est représentée par le tracé formé d'oscillations représentant des rafales successives et qui est la reproduction exacte d'un enregistrement.

La trajectoire de l'avion a été tracée pour montrer qu'elle est faite de descentes et de montées dont l'importance varie avec la grandeur des rafales.

la vitesse instantanée du vent obtenu en cinquante-deux minutes et qui est reproduit page 6 (fig.3), on se rend compte que pendant ce laps de temps, un certain nombre de grands maxima et de grands minima ont été enregistrés; mais si l'on examine des tracés inscrits sur des cylindres à grande vitesse de rotation par des instruments très sensibles, on constate qu'il existe aussi des oscillations beaucoup plus petites. Il y a lieu de ne pas confondre ces diverses oscillations. Les vagues sont les oscillations qui durent une minute environ; les rafales sont celles dont la durée est d'environ une dizaine de secondes; les pulsations sont celles qui sont inférieures comme durée à la seconde.

Il est évident que toutes ces oscillations doivent avoir sur les oiseaux, comme sur les avions, une action analogue à celle qu'elles produisent sur les appareils enregistreurs.

Il est un fait qui ressort des essais que j'ai faits en 1914, c'est qu'à chaque passage de rafale, on peut faire gagner de la hauteur à un avion voilier, grâce à l'énergie que l'appareil emprunte au vent. Il est même possible de décoller direc-

tement de terre dans certaines conditions. J'y suis parvenu une fois mais pour faciliter le départ et obtenir dès le début une hauteur et une vitesse favorables, il y a avantage comme je l'ai indiqué à se servir d'un plan incliné relevé à sa partie inférieure; toutefois, la lancée doit se faire de façon méthodique. En effet, un avion lancé sur un tel plan retombe sur le sol si le départ, qui doit avoir lieu contre le vent, s'effectue sans méthode. Au contraire, j'affirme qu'on lui fait presque à coup sûr gagner de la hauteur si cette lancée a lieu au moment où une rafale commence, au moment où la force du vent est croissante. Dans ces conditions, lorsque l'appareil a quitté le plan incliné, on sent bientôt qu'il est porté par le vent. Il suffit alors pour aider à la montée de tirer sur le manche à balai pour relever le gouvernail de profondeur, et cela, d'autant moins que la vitesse du vent est plus grande. Il est en outre préférable de maintenir l'avion légèrement cabré tant que la force du vent est croissante. Dès que celle-ci commence à diminuer, il faut aussitôt pousser le manche à balai pour abaisser le gouvernail de profondeur et faire piquer le voilier, sinon on s'exposerait à se trouver rapidement en perte de vitesse.

Ces manœuvres s'effectueront beaucoup plus facilement si le siège du pilote est mobile (!), ce qui permet d'avancer ou de reculer à volonté le centre de gravité de l'avion. Dès que l'avion a piqué, et pris une certaine vitesse, le pilote doit exécuter, pendant tout le temps que le vent est plus calme, un vol plané et s'efforcer de perdre le moins de hauteur possible, ce qui oblige à donner aux appareils destinés à ce genre de vol une finesse très grande. Ces manœuvres doivent se répéter à chaque passage de rafales de façon à amener l'avion à décrire dans l'espace une trajectoire faite de montées et de descentes successives, qu'il faut savoir diriger pour conserver à l'appareil une vitesse de vol suffisante (fig. 29).

Cette sorte de vol à voile peut s'exécuter aussi en décrivant des orbes; mes expériences m'ont prouvé que cette réalisation est plus difficile; on est en effet très à même de virer au moment du maximum de la rafale de manière à avoir le vent arrière pendant qu'on plane; il est par contre impossible d'effectuer le virage en temps utile à l'arrivée de la rafale suivante. Ce résultat ne pourra d'ailleurs être obtenu que lorsqu'il existera des indicateurs de rafale de conception particulière.

Tous les vents, et par conséquent toutes les rafales ne sont pas bonnes pour le vol à voile. Celles-ci, comme je l'ai déjà dit, possèdent une énergie qui varie avec la vitesse du vent. Dans les vents faibles, elles ont une amplitude plus petite que dans les vents forts. C'est pourquoi les rafales des vents à vitesse réduite ne peuvent pas être utilisées par un avion de vol à voile, comme par les voiliers marins d'ailleurs, parce qu'elles ne renferment pas assez d'énergie. Les rafales des vents de grande tempête ne sont guère utilisables non plus et sont même dangereuses en raison de l'excès d'énergie qu'elles renferment. Par contre, les vents à rafales de grande amplitude se révèlent comme les plus favorables, à condition que leur vitesse moyenne ne dépasse pas 20 mètres à la seconde; elles ont une durée assez longue pour que le pilote ait le temps de manœuvrer. Les pulsations du vent, de leur côté, sont sans intérêt immédiat pour les pilotes, car elles sont trop rapides pour qu'ils puissent s'en servir; mais elles ne sont pas sans effet cependant, comme je l'ai montré; elles ont une action indéniable sur l'aile, mais cette action est automatique.

Il est certain que l'avenir de ce genre de vol à voile est intimement lié à la connaissance de la structure du vent. On ne sait pas encore ce qu'est une rafale, ni ce qui la produit, et par conséquent comme elle agit exactement. Faut-il voir dans les oscillations la manifestation sur nos appareils enregistreurs de tourbillons d'air? Dans ce cas, ces tourbillons sont-ils à axe horizontal, vertical ou de toute autre direction? Il y a là, comme on le voit, une grosse question à trancher.

Le problème sera toutefois bien près d'être résolu, et il sera possible de voler

(1) Voir Magnan, Les caractéristiques des Oiseaux suivant le mode de vol. L'application à la construction des avions. Ann. des Sc. Nat. Zoologie Masson 1922.

sur de grandes distances et même dans une direction fixée à l'avance, lorsque, par une étude statistique approfondie, il aura été possible d'être mieux renseigné sur la forme des rafales et sur leur durée, et surtout lorsque nous aurons les moyens de fixer le moment d'arrivée de chaque rafale.

Nos réflexes étant insuffisants, nous ne pouvons pas profiter à coup sûr de l'énergie contenue dans une rafale. Il nous manque encore des appareils précis pour nous annoncer qu'une rafale arrive à l'avion.

C'est un des points qui depuis longtemps déjà a retenu mon attention.

En effet, lorsqu'il s'agit de piloter un avion destiné à utiliser les variations de vitesse du vent horizontal, on doit savoir à chaque instant si la vitesse de ce vent croît ou décroît pour exécuter les manœuvres nécessaires. J'ai déjà imaginé pour cela un anémomètre à sirène qui m'a rendu de grands services. Il permet de présenter l'avion contre le vent, d'élever la queue et de ramener le centre de gravité en arrière assez à temps pour gagner facilement de la hauteur. Il permet de parer aux dangers de la perte de vitesse et de faire piquer l'avion à temps, dès que la vitesse du vent décroît.

Mais il y a mieux à faire. MM. Huguenard, Planiol et moi avons effectué des recherches à ce sujet. Nous avons conçu à l'heure actuelle un indicateur de direction du vent, un indicateur de rafale et un indicateur de flexion d'ailes qui, lorsqu'ils seront au point, c'est-à-dire rendus peu encombrants, seront susceptibles d'être particulièrement utiles.

Par l'exposé que je viens de faire, on voit donc que le succès dépend des expériences de laboratoire. C'est ce qu'ont fort bien compris les Allemands. Ceux-ci, après avoir construit des appareils très fins, ont montré qu'ils savaient voler dans des vents ascendants. Leur but est maintenant de chercher à utiliser les variations de vitesse des vents horizontaux en vue d'effectuer de vrais voyages. Leur but est aussi de réaliser des avions à faible puissance, afin de rendre l'aviation populaire. On a dit que leur succès dans la Rhön tenait seulement au choix heureux du terrain. Il tient aussi et surtout à ce que les Allemands se sont livrés depuis 1916, sur l'ordre de leur Etat-Major dit-on, à des études sur la nature des vents et le vol des oiseaux, à ce que ces études ont été faites par les professeurs des Ecoles techniques allemandes et par leurs élèves, qui ont été en outre les pilotes des avions sans moteur.

Si nous voulons réussir vite, il nous faudra employer la même méthode.

